

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Blanka Aščić

Zagreb, 2012. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ANALIZA OTPORNOSTI NA SUDAR LPG
BRODOVA SA SPREMNICIMA TIPA C**

Mentor:

Studentica:

Dr. sc. Smiljko Rudan, dipl. ing.

Blanka Aščić

Zagreb, 2012. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu te uz vodstvo mentora dr.sc. Smiljka Rudana.

Zahvaljujem se svom mentoru, Smiljku Rudanu, na pomoći, pristupačnosti, entuzijazmu i pregrštu savjeta pruženih prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Veliko hvala mojoj majci i sestri, na nesebičnoj i bezuvjetnoj podršci pruženoj tokom studija i života.

Hvala kolegama na pomoći oko fakultetskih obveza i veselim druženjima.

Svim mojim prijateljima, koji su oplemenili moj život.

I na kraju, hvala Ivanu. Na svemu.

Blanka Aščić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne
simulacije

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

Referada za diplomske i završne ispite

Obrazac DS - 3A/PDS - 3A

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| SAŽETAK..... | VII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Općenito o LNG i LPG plinovima | 1 |
| 1.2. Pregled procesa ukapljivanja prirodnog plina..... | 2 |
| 1.3. Povijesni pregled prijevoza ukapljenih plinova | 3 |
| 1.4. Osnovne značajke brodova za prijevoz ukapljenog plina | 4 |
| 1.5. Stanje LNG tržišta..... | 6 |
| 1.6. Svjetska pomorska LNG flota..... | 7 |
| 2. SUDARI BRODOVA..... | 9 |
| 2.1. Mehanika brodskih sudara | 10 |
| 2.2. Vanjska dinamika broda prilikom sudara | 11 |
| 2.3. Unutarnja mehanika brodskih sudara..... | 16 |
| 2.3.1. Smjer prodiranja pramca | 17 |
| 2.3.2. Geometrija pramca udarajućeg broda | 19 |
| 2.3.3. Deformacija bočne stijenke udarenog broda..... | 20 |
| 3. METODA KONAČNIH ELEMENATA | 23 |
| 3.1. Uvod..... | 23 |
| 3.2. Osnove metode konačnih elemenata (MKE) | 23 |
| 3.3. Različiti pristupi izvođenju osnovne jednadžbe u metodi konačnih elemenata..... | 24 |
| 4. NUMERIČKI MODELI ZA ANALIZU SUDARA | 27 |
| 4.1. Brod 1 – udarajući brod | 27 |
| 4.1.1. Opis modela | 27 |
| 4.1.2. Rubni uvjeti i opterećenja | 30 |
| 4.2. Brod 2 – udareni brod | 31 |
| 4.2.1. Opće značajke udarenog broda | 31 |
| Udareni brod je LPG tanker sa spremnikom tipa C. | 31 |
| 4.2.2. Opis modela i njegova prilagodba LS-Dyna softveru..... | 32 |
| 4.2.3. Rubni uvjeti i opterećenja | 38 |
| 4.3. Materijali..... | 42 |
| nelinearnu ovisnost sile o pomaku opruge.[8] | 42 |
| 4.4. Preliminarni proračun sa grubom mrežom konačnih elemenata..... | 43 |
| 5. NUMERIČKA ANALIZA | 44 |
| 5.1. Sudar 1 | 45 |
| 5.2. Sudar 2 | 47 |
| 5.3. Sudar 3 | 48 |
| 5.4. Sudar 4 | 50 |

| | |
|--|----|
| 5.5. Sudar 5 | 52 |
| 5.6. Analiza i usporedbe različitih scenarija sudara | 54 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 59 |
| LITERATURA..... | 60 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Brod za prijevoz ukapljenog plina <i>Energy Frontier</i> , u vlasništvu Tokyo LNG Tanker Co., Ltd..... | 3 |
| Slika 2. Kuglasti (Mossov) spremnik, tip C, [2] | 5 |
| Slika 3. Zemlje izvoznice prirodnog plina, [3]..... | 6 |
| Slika 4. Zemlje uvoznice prirodnog plina, [3] | 6 |
| Slika 5. Stradali brodovi kategorizirani po tipu nesreće, [5]..... | 9 |
| Slika 6. Sudar brod – brod i sudar brod – plutajući kontejner, [6]..... | 11 |
| Slika 7. Sudar brod – plutajuće deblo i brod – čvrsti zid, [6]..... | 11 |
| Slika 8. Sudar dvaju sličnih brodova, [6] | 12 |
| Slika 9. Scenarij sudara brod-brod i smjer prodiranja, [6] | 17 |
| Slika 10. Brzina u točki sudara, bočni prikaz prodiranja pramca, [6]..... | 18 |
| Slika 11. Geometrija konvencionalnog pramca | 19 |
| Slika 12. Geometrija pramca s bulbom | 19 |
| Slika 13. Udarajući pramac s bulbom oštećuje bok udarenog broda | 20 |
| Slika 14. Deformacija oplata uslijed koncentrirane sile..... | 20 |
| Slika 15. Pramčani bulb udara oplatu ekscentrično | 21 |
| Slika 16. Ekvivalentna debljina ukrepljene oplata | 22 |
| Slika 17. Mjesto sudara na najvišoj palubi udarenog broda..... | 22 |
| Slika 18. Linijski konačni element | 25 |
| Slika 19. Plošni konačni element | 25 |
| Slika 20. Trodimenzionalni konačni element..... | 26 |
| Slika 21. Fina mreža pramca udarajućeg broda | 27 |
| Slika 22. Presjek pramca udarajućeg broda | 28 |
| Slika 23. Diskretizirana krivulja rasporeda mase, [8] | 29 |
| Slika 24. Pramac udarajućeg broda, gredni elementi i opruge..... | 29 |
| Slika 25. Udarajući brod sa označenim rubnim uvjetima i opterećenjima..... | 30 |
| Slika 26. Brod u balastu, shematski prikaz, [2]..... | 31 |
| Slika 27. Kartica kojom se definiraju čvorovi u <i>SESAMU</i> , [9]..... | 32 |
| Slika 28. Kartica kojom se definiraju čvorovi u <i>LS-Dyna-i</i> , [10] | 32 |
| Slika 29. Model LNG tankera | 33 |
| Slika 30. Dvodijelni (bi-lobe) spremnik LNG tankera..... | 34 |
| Slika 31. Cilindrični spremnik LNG tankera | 34 |
| Slika 32. Presjek kroz spremnik, dvodno i gredni elementi koji spajaju spremnik sa brodskom strukturom | 35 |
| Slika 33. Sredina broda sa dvodijelnim spremnikom te trima točkama koncentrirane mase... 36 | 36 |
| Slika 34. Srednji dio broda bez elemenata sa finom mrežom | 36 |
| Slika 35. Dio boka broda sa finom mrežom..... | 37 |
| Slika 36. Sredina broda sa rubnim uvjetima pregrade i koncentriranih masa..... | 38 |
| Slika 37. Sredina udarenog broda sa rubnim uvjetima pregrade i rubni čvorovi suprotnog kraja | 39 |
| Slika 38. Raspored sile uzgona po vanjskoj oplati dvodna | 39 |
| Slika 39. Smjer djelovanja inercijskih sila uslijed brzine i ubrzanja na boku udarenog broda 40 | 40 |
| Slika 40. Spriječen pomak i inercijske sile u čvorovima koncentriranih masa..... | 41 |
| Slika 41. Sudar bez i sa inercijskim silama na boku udarenog broda | 43 |
| Slika 42. Općeniti prikaz sudara | 44 |

| | |
|--|----|
| Slika 43. Oba broda prije sudara na gazovima u balastu | 45 |
| Slika 44. Ukupna (von Mises) naprezanja na boku udarenog broda pri brzini $v=5$ m/s..... | 45 |
| Slika 45. Razina napredovanja pramca u bok udarenog broda pri brzini $v=5$ m/s | 46 |
| Slika 46. Ukupna (von Mises) naprezanja na boku udarenog broda pri brzini sudara $v=8$ m/s | 47 |
| Slika 47. Razina napredovanja pramca u bok udarenog broda pri brzini $v=8$ m/s | 48 |
| Slika 48. Ukupna (von Mises) naprezanja na boku udarenog broda pri brzini sudara $v=10$ m/s | 49 |
| Slika 49. Razina napredovanja pramca u bok udarenog broda pri brzini $v=10$ m/s | 49 |
| Slika 50. Prikaz oba broda prije sudara pri brzini $v=8$ m/s i s povećanim gazom udarenog broda..... | 50 |
| Slika 51. Ukupna (von Mises) naprezanja na boku udarenog broda pri brzini sudara $v=8$ m/s i s povećanim gazom udarenog broda..... | 50 |
| Slika 52. Razina napredovanja pramca u bok udarenog broda pri brzini $v=8$ m/s i s povećanim gazom udarenog broda | 51 |
| Slika 53. Prikaz oba broda prije sudara pri brzini $v=8$ m/s i sa smanjenim gazom udarenog broda..... | 52 |
| Slika 54. Ukupna (von Mises) naprezanja na boku udarenog broda pri brzini sudara $v=8$ m/s i sa smanjenim gazom udarenog broda | 52 |
| Slika 55. Razina napredovanja pramca u bok udarenog broda pri brzini $v=8$ m/s i sa smanjenim gazom udarenog broda..... | 53 |
| Slika 56. Prodor udarajućeg bulba u strukturu dvodna | 53 |
| Slika 57. Dijagram brzina udarajućeg i udarenog broda za $v=8$ m/s | 54 |
| Slika 58. Dijagram pomaka točaka koncentriranih masa udarenog broda..... | 55 |
| Slika 59. Sudar pri brzini $v=8$ m/s i vremenu $t = 0.53$ s | 56 |
| Slika 60. Sudar pri brzini $v=8$ m/s i vremenu $t = 0.82$ s | 56 |
| Slika 61. Sudar pri brzini $v=8$ m/s i vremenu $t = 1.1$ s | 56 |
| Slika 62. Ukupna (von Mises) naprezanja i deformacija spremnika pri brzini $v=8$ m/s i vremenu $t = 1.1$ s | 57 |
| Slika 63. Plastična naprezanja pri brzini $v=8$ m/s i vremenu $t = 1.1$ s | 57 |
| Slika 64. Plastična naprezanja na boku, sudar pri brzini $v=5$ m/s i vremenu $t = 0.53$ s..... | 58 |
| Slika 65. Plastična naprezanja na boku, sudar pri brzini $v=8$ m/s i vremenu $t = 0.53$ s..... | 58 |
| Slika 66. Plastična naprezanja na boku, sudar pri brzini $v=10$ m/s i vremenu $t = 0.53$ s..... | 58 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Svjetska flota LNG brodova, rujan, 2012. godine[4] | 7 |
| Tablica 2. Svjetska flota LNG brodova, ožujak, 2012. godine [4] | 8 |
| Tablica 3. Brod u balastu, osnovni podaci, [2]..... | 31 |
| Tablica 4. Scenariji sudara | 44 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-----------|------------------|--|
| V_{ax} | m/s | Brzina napredovanja udarajućeg broda |
| V_{ay} | m/s | Brzina ljućanja udarajućeg broda |
| V_{b1} | m/s | Brzina napredovanja udarenog broda |
| V_{b2} | m/s | Brzina ljućanja udarenog broda |
| ζ | | Smjer vektora normale sudarne površine u trenutku sudara |
| M_a | kg | Masa udarajućeg broda |
| F_ζ | N | Sila u smjeru osi ζ |
| F_η | N | Sila u smjeru osi η |
| | m/s ² | Ubrzanje u smjeru osi ζ |
| | m/s ² | Ubrzanje u smjeru osi η |
| | m/s | Brzina u smjeru osi η |
| | m/s | Brzina u smjeru osi ζ |
| | s | Vrijeme trajanja sudara |
| | Hz | Frekvencija |
| m_{ax} | | Koeficijent dodane mase za poniranje |
| m_{ay} | | Koeficijent dodane mase za ljućanje |
| | m ² | Površina |
| R_a | m | Radus momenta inercije |
| μ | | Koeficijent trenja |
| E_ζ | J | Kinetička energija |
| E_η | J | Kinetička energija |

SAŽETAK

Ukapljeni plin jedan je od najvažnijih energenata današnjice. Diljem svijeta transportira se cjevovodima ili ukapljen u spremnicima brodova za prijevoz prirodnog (LNG) ili petrolejskih plinova (LPG). Nezavisni spremnici tipa C, koji ukapljeni plin prevoze pod tlakom i djelomično pothlađen, najčešće su cilindričnog ili dvodijelnog oblika i projektiraju se prema pravilima klasifikacijskih društava. Prilikom sudara prijeti opasnost od probijanja jednostruke bočne stijenke broda čime se povećava mogućnost oštećenja samog spremnika. Cilj ovog rada je analizirati i usporediti nekoliko scenarija sudara u bok LPG broda.

ABSTRACT

Liquefied gas is one of the most important energy-generator products. It is being transported all around the world by piping systems or liquefied in tanks of LNG and LPG carriers. The independent tanks of type C, which contain liquefied gas both under pressure and refrigerated, are most commonly made in cylindrical or bilobe shape and are designed according to the Rules of classification societies. During collision the striking bow can penetrate through side structure of the struck ship and therefore increase the possibility of damaging the tank. The scope of the work is to analyze several different collision scenarios and make a comparison.

.

1. UVOD

Stalan razvoj svjetskog gospodarstva izravno utječe na rast potrebe za različitim vrstama energije. Među njima, tekući plinovi predstavljaju udjelom značajan i ekološki vrlo prihvatljiv izvor energije. Pri tome se jednako misli na ukapljene petrolejske plinove (Liquefied Petroleum Gas, LPG), kao što su etan, propan, butan i njihova mješavina etilen, te ukapljeni prirodni plin (Liquefied Natural Gas, LNG) koji je po svom sastavu uglavnom metan. Postoji velika razlika između načina prijevoza i tretiranja LPG tereta i etilena s jedne strane, od prijevoza prirodnog ukapljenog plina s druge strane. Međutim, zajedničko svim brodovima za prijevoz ukapljenih plinova je visoka tehnološka složenost te zahtjev za pojačanu sigurnost pri rukovanju opasnim teretima. Prirodni plin se od izvora do potrošača najčešće transportira visokotlačnim plinovodima. Kada je udaljenost između mjesta proizvodnje i potrošnje veća od 4000 km, a i zbog diversifikacije dobavnih pravaca prirodnog plina, sve se više primjenjuje ukapljivanje prirodnog plina i njegov transport brodovima.

1.1. Općenito o LNG i LPG plinovima

Agregatno stanje plina ovisi o dva parametra: temperaturi i tlaku. Iznad tzv. kritične temperature, povećanjem tlaka plin se ne može dovesti u ukapljeno stanje. Ta je kritična temperatura specifična značajka pojedinog plina. Plinovi kojima je kritična temperatura viša od temperature okoline mogu se u tekuće agregatno stanje dovesti povećanjem tlaka, dok plinove kod kojih to nije slučaj treba rashladiti ispod kritične temperature.

LNG - ukapljeni zemni plin ili ukapljeni prirodni plin je pročišćeni zemni plin rashlađivanjem pretvoren u tekuće stanje, radi lakšeg prijevoza. Ukapljeni prirodni plin zauzima oko 1/600 volumena prirodnog plina u plinovitom stanju. Bez mirisa, bez boje, netoksičan je i nekorodira. Opasnosti su gorivost, smrzavanja i gušenja.

LPG - ukapljeni naftni plin je mješavina ukapljenih ugljikovodika nastalih preradom nafte koji su u normalnom stanju plinovi, a pri povećanju tlaka prelaze u tekuće stanje. Ukapljeni naftni plin se sastoji većinom od propana C_3H_8 ili butana C_4H_{10} , a najčešće je smjesa oba plina.

1.2. Pregled procesa ukapljivanja prirodnog plina

Konačan izbor procesa za ukapljivanje prirodnog plina ovisiti će o varijablama projekta, stupnju razvoja novih ili poboljšanja postojećih procesa i raspoloživosti potrebne opreme.

Proces odabira počinje u ranoj fazi razvoja projekta, najčešće tijekom izrade studije izvedivosti u kojoj je jedan od ključnih ulaznih podataka količina plina za ukapljivanje. Postrojenja za ukapljivanje najčešće su smještena uz obalu i u blizini luka s većom dubinom mora zbog prihvata brodova sve veće zapremine koji odvoze ukapljeni prirodni plin. Osim toga mogu biti izgrađena i kao plutajući objekti usidreni u blizini kopnenih ili priobalnih polja prirodnog plina. S povećanjem prometa ukapljenim prirodnim plinom nastavljaju se tražiti načini za smanjenje troškova postupka ukapljivanja. Usprkos složenosti, postrojenja za ukapljivanje su zapravo veliki hladnjaci, a hlađenje je bit procesa ukapljivanja. Budući je hlađenje povezano s velikom potrošnjom energije, postojeća komercijalna postrojenja za ukapljivanje prirodnog plina nastoje svesti na minimum razliku u temperaturi između prirodnog plina koji se podvrgava hlađenju i rashladnog sredstva pomoću kojeg se plin hladi. To se postiže odabirom rashladnog sredstva i primjenom više ciklusa hlađenja. Na svim modernim postrojenjima za ukapljivanje, prirodni plin se ukapljuje kroz dva ili tri ciklusa hlađenja.

Danas se najčešće primjenjuju sljedeći procesi:

- proces s miješanim rashladnim sredstvom uz pothlađivanje propanom (*Propane Preecold Mixed Refrigerant Process - C3 MR*)
- modificirani procesi s miješanim rashladnim sredstvom uz pothlađivanje propanom - *C3MR/Split i AP-X proces*
- optimizirani kaskadni proces
- kaskadni proces s miješanim fluidima (*Mixed Fluid Cascade Process - MFC*)
- proces s dva miješana rashladna sredstva (*Dual Mixed Refrigerant Process - DMR*)
- liquefin proces
- PRICO process

Inovacije u razvoju tehnologije koncentriraju se na bolju učinkovitost procesa, ekonomičnost u smislu izdvajanja tekućih goriva, smanjenje emisija štetnih plinova, a u konačnici i na kapacitet postrojenja.

1.3. Povijesni pregled prijevoza ukapljenih plinova

Ideja o prijevozu ukapljenog prirodnog plina brodovima javlja se već 1915. godine, kada je Godfrey L. Cabot u Bostonu patentirao teglenice posebno konstruirane za prijevoz ukapljenog plina rijekama, ali ta ideja nije provedena u djelo. Prvi brod za ukapljeni prirodni plin bio je *Methane Pioneer*. Imao je skladišni prostor od 5000 m³, a nastao je pretvorbom američkog teretnog broda *Normati*, 1958. godine. Teretni se prostor sastojao od pet aluminijskih samonosivih prizmatičnih spremnika, koji su bili toplinski izolirani drvenim pločama. Postojala je i sekundarna zaštitna pregrada za slučaj istjecanja ukapljenog plina. *Methane Pioneer* je započeo svoju prvu plovidbu u siječnju 1959. Godine, a 1972. godine povučen je iz uporabe i pretvoren u spremnik za ukapljeni prirodni plin. *Methane Princess* i *Methane Progress* su prvi komercijalni brodovi za ukapljeni prirodni plin. Sagrađeni su 1964. godine u britanskim brodogradilištima. Svaki je imao po devet prizmatskih spremnika, ukupnog obujma 27400 m³. Nakon 1970. godine došlo je do velikog razvoja tehnologije izgradnje brodova što je rezultiralo pojavom brodova za ukapljeni prirodni plin velike zapremine, od 125000 m³ do 138000 m³.



Slika 1. Brod za prijevoz ukapljnog plina *Energy Frontier*, u vlasništvu Tokyo LNG Tanker Co., Ltd.

Ltd.

1.4. Osnovne značajke brodova za prijevoz ukapljenog plina

Moderni brodovi za prijevoz ukapljenog prirodnog plina su brodovi s dvostrukim dnom čija se klasifikacija vrši prema tipu spremnika. Spremnici su posebno projektirani budući se u njima skladišti prirodni plin ohlađen na $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$, što je temperatura vrelišta metana. Kako cijena sustava spremnika doseže gotovo polovicu vrijednosti cijelog broda, konstrukcije spremnika sveobuhvatno su zaštićene patentima.

Bitna karakteristika ukapljenog prirodnog plina je visoka zapaljivost, o čemu treba voditi računa pri projektiranju i rukovanju brodom, stoga su tankeri za prijevoz ukapljenih plinova brodovi sa vrlo složenim sustavom za rukovanje teretom. Očekivani vijek trajanja LNG brodova je 35 do 40 godina.

Spremnik za prijevoz ukapljenog prirodnog plina mora imati sljedeće karakteristike:

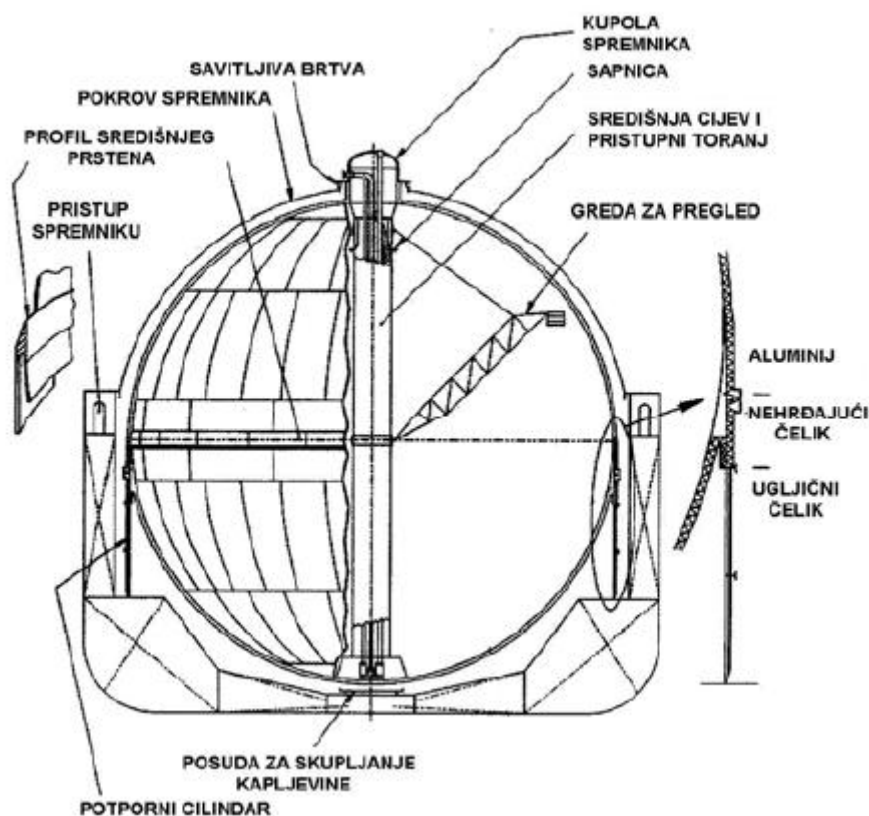
- biti plinotijesan kako bi se spriječilo miješanje plina sa zrakom, kao i gubitak ukapljenog plina;
- biti toplinski izoliran kako bi se, u što je moguće većoj mjeri, spriječilo zagrijavanje ukapljenog prirodnog plina odnosno hlađenje trupa broda, što povećava krtost čelika i može uzrokovati kolaps unutarnje strukture broda;
- biti dovoljne čvrstoće da podnese hidrostatski tlak ukapljenog prirodnog plina i mali pretlak koji se javlja unutar spremnika

Posebnu pozornost pri konstrukciji spremnika za prijevoz ukapljenog prirodnog plina treba pridati zapljuskivanju fluida unutar spremnika. Naime, tijekom plovidbe brod se naginje, a gibanje se prenosi na fluid unutar spremnika koji udara o stijenke spremnika. Na mjestima udara javlja se povećani tlak koji može oštetiti stijenku ili čak toplinsku izolaciju spremnika.

Postoje dvije osnovne vrste spremnike na brodovima za prijevoz ukapljenog plina: integralni i nezavisni. Integralni spremnici u cijelosti ili djelomično sudjeluju u čvrstoći broda, dok nezavisni spremnici ne sudjeluju u čvrstoći broda.

Spremnike je moguće podijeliti u sljedeće kategorije:

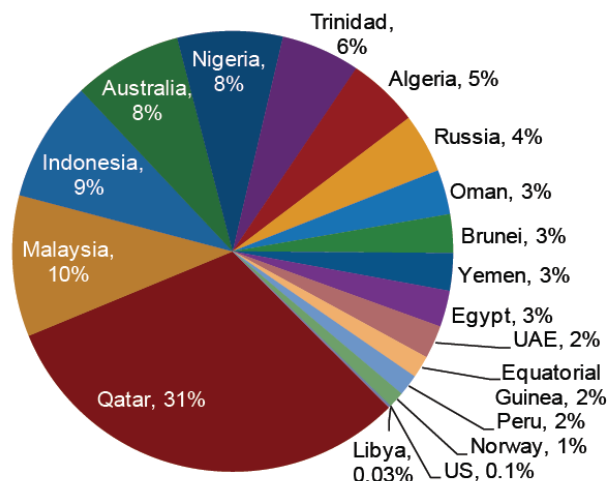
1. integralne, koji su sastavni dio brodske strukture i izravno sudjeluju u čvrstoći trupa,
2. membranske, kod kojih se nenosiva membrana u potpunosti oslanja na izolaciju,
3. polu-membranske, kod kojih se membrana djelomično oslanja na izolaciju,
4. nezavisne spremnike tipa A, B i C.



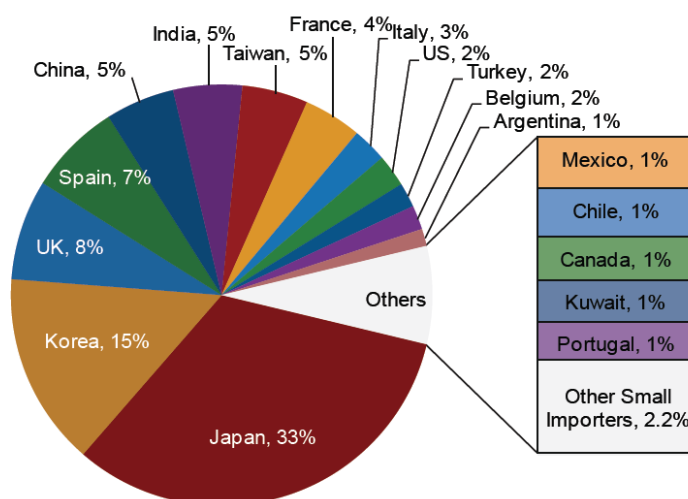
Slika 2. Kuglasti (Mossov) spremnik, tip C, [2]

1.5. Stanje LNG tržišta

Zemni plin trenutno je prirodni energent s najvećim povećanjem potrošnje u svijetu i s konstantnim rastom od 3.2% što, primjerice, iznosi gotovo dvostruko više od trenutne svjetske potrošnje ugljena. Izvršna prirodna svojstva zemnog plina, kao i činjenica da su regije svijeta koje su njegov najveći potrošač, deficitarna u rezervama zemnog plina, bili su među glavnim razlozima koji su pomogli izuzetnom rastu tog tržišta posljednjih godina. [1]



Slika 3. Zemlje izvoznice prirodnog plina, [3]



Slika 4. Zemlje uvoznice prirodnog plina, [3]

Dugoročne procjene, vezane za proizvodnju i potrošnju LNG-a u svijetu, pretpostavljaju da će se nakon završetka svjetske gospodarske krize, odnosno oporavka svjetske ekonomije, koja neće u nekom većem, odnosno značajnijem omjeru utjecati na proizvodnju LNG-a, nastaviti trend godišnjeg povećanja potrošnje tog energenta na svjetskoj razini. Predviđa se kako će ukupna svjetska potrošnja prirodnog plina u svijetu, sa 2,38 trilijuna kubnih metara iz 1999. godine, dostići 4,6 trilijuna kubnih metara do 2030. godine.

1.6. Svjetska pomorska LNG flota

Svjetska flota LNG brodova relativno je mala u apsolutnim brojevima u odnosu na flote drugih brodova za prijevoz tekućih tereta, odnosno rasutih tereta. Jedan od razloga je u visokoj cijeni i kompleksnoj tehničkoj izvedbi zbog čega mali broj brodogradilišta u svijetu ima mogućnost gradnje brodova takvog tipa.

Tablica 1. Svjetska flota LNG brodova, rujan, 2012. godine[4]

| | Izgrađeni LNG brodovi | | | | | | | | |
|---|-----------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|--------|
| | 1960e | 1970e | 1980e | 1990e | 2000e | 2010 | 2011 | 2012 | Ukupno |
| GRUPA | | | | | | | | | |
| Q-Max (250 do 300 000 m ³) | | | | | 10 | 3 | | | 13 |
| Q-Flex(200 do 250 000 m ³) | | | | | 31 | 1 | | | 32 |
| "Standard" (100 do 200 000 m ³) | | 21 | 19 | 38 | 181 | 19 | 11 | 1 | 290 |
| Small (manje od 100 000 m ³) | 2 | 7 | | 8 | 5 | | | | 22 |
| Ukupno | 2 | 28 | 19 | 46 | 227 | 23 | 11 | 1 | 357 |

| | Naručeni LNG brodovi | | | | | |
|---|----------------------|------|------|------|------|--------|
| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | Ukupno |
| GRUPA | | | | | | |
| Q-Max (250 do 300 000 m ³) | | | | | | 0 |
| Q-Flex(200 do 250 000 m ³) | | | | | | 0 |
| "Standard" (100 do 200 000 m ³) | 1 | 22 | 33 | 19 | 2 | 77 |
| Small (manje od 100 000 m ³) | | | | | | 0 |
| Ukupno | 1 | 22 | 33 | 19 | 2 | 77 |

| | Ukupna flota |
|---|--------------|
| GRUPA | |
| Q-Max (250 do 300 000 m ³) | 13 |
| Q-Flex(200 do 250 000 m ³) | 32 |
| "Standard" (100 do 200 000 m ³) | 367 |
| Small (manje od 100 000 m ³) | 22 |
| Ukupno | 434 |

Tablica 2. Svjetska flota LNG brodova, ožujak, 2012. godine [4]

| | Izgrađeni LPG brodovi | | | | | |
|------------------------------------|-----------------------|-------|-------|------|------|--------|
| | prije 1990e | 1990e | 2000e | 2010 | 2011 | Ukupno |
| GRUPA | | | | | | |
| Veliki (>70000 m ³) | 7 | 36 | 84 | 8 | 4 | 139 |
| Srednji (50-70000 m ³) | 0 | 4 | 16 | 0 | 0 | 20 |
| Handy (30-50000 m ³) | 1 | 14 | 30 | 6 | 2 | 53 |
| Mali (10-30000 m ³) | 12 | 16 | 10 | 5 | 4 | 47 |
| Ukupno | 20 | 70 | 140 | 19 | 10 | 259 |

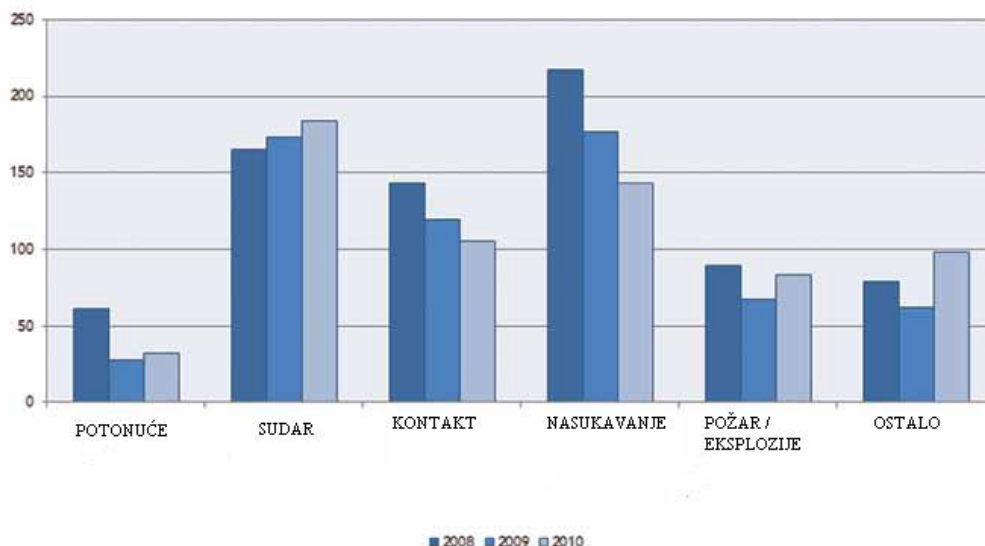
| | Naručeni LPG brodovi | | | | |
|------------------------------------|----------------------|------|------|------|--------|
| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | Ukupno |
| GRUPA | | | | | |
| Veliki (>70000 m ³) | 3 | 7 | 1 | 0 | 11 |
| Srednji (50-70000 m ³) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Handy (30-50000 m ³) | 0 | 0 | 4 | 4 | 8 |
| Mali (10-30000 m ³) | 0 | 5 | 0 | 0 | 5 |
| Ukupno | 3 | 12 | 5 | 4 | 24 |

| | Ukupna flota |
|------------------------------------|--------------|
| GRUPA | |
| Veliki (>70000 m ³) | 150 |
| Srednji (50-70000 m ³) | 20 |
| Handy (30-50000 m ³) | 61 |
| Mali (10-30000 m ³) | 52 |
| Ukupno | 283 |

Prema podacima iz tablica vidljivo je da je svjetska pomorska flota LNG brodova veća od one LPG brodova.

2. SUDARI BRODOVA

Sve veći promet brodova i njegova koncentracija u pojedinim područjima, posebno na glavnim trgovačkim rutama, značajno povećava vjerojatnost nezgoda na moru. Kako bi se poboljšala sigurnost plovidbe i izbjegli mogući gubici ljudskih života, šteta na imovini, a i onečišćenja okoliša, potrebno je uspostaviti odgovarajući sustav za usmjeravanje plovidbe i njezin nadzor. Uspostava takva sustava složen je i financijski zahtjevan posao, a planiranje zahtijeva detaljnu analizu prometnih tokova i procjenu vjerojatnosti nastanka sudara, ne samo u trenutku promatranja nego i za određeno vrijeme unaprijed. Kako je more prirodni put i kako se pri izboru ruta od polazne točke do završne uzima ona najkraća, poštujući elemente sigurnosti, redovita je pojava grupiranja brodova u pojedinim smjerovima kretanja. U uvjetima otvorenog mora, gdje nema posebnih ograničenja kretanja brodova i gdje je odabir rute prepušten posadi broda, tri najčešće situacije koje uzrokuju povećani rizik od sudara brodova jesu križanja smjerova kretanja, približavanje u suprotnim smjerovima kretanja i pretjecanje. Prema podacima Europske pomorske agencije iz 2010. godine [5], jasno je vidljivo kako je veliki broj pomorskih nesreća uzrokovan upravo sudarima i nasukavanjem brodova.



Slika 5. Stradali brodovi kategorizirani po tipu nesreće, [5]

2.1. Mehanika brodskih sudara

Određivanje oštećenja broda uključenog u pojedini sudar sastoji se od definicije opterećenja tijekom sudara i primjene odgovarajuće metode proračuna odziva konstrukcije. Opterećenje je razumno definirati skupom ulaznih parametara te ovisi, između ostalog, o relativnoj krutosti struktura koje su se sudarile. Posebice gledano, opis opterećenja broda uključenog u sudar brodova uključuje brzinu brodova, geometriju sudara (lokaciju oštećenja), kut udara, relativnu orijentaciju sudarenih plovila, stanje krcanja (obično se promatraju puno stanje i balastno stanje), gaz, trim, oblik pramca, konstrukcijsku izvedbu trupa i pramca, stanje mora, uvjete vjetrova i struje i razinu održavanja broda. Ljudski faktor također može utjecati na posljedice, posebice na samu mogućnost sudara, kao i detalje događaja.

Postupak analize se dijeli u dva dijela: vanjska dinamika i unutarnja mehanika.

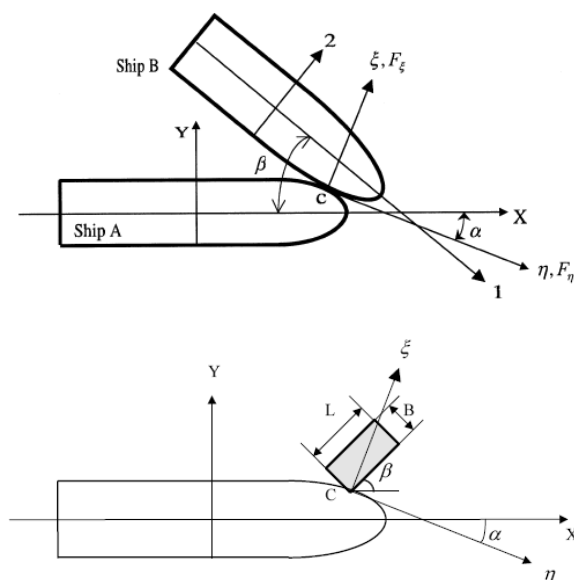
Analiza vanjske dinamike bavi se gibanjima broda i utjecajem okolne vode na njih. Cilj vanjske dinamike je procjena utjecaja kinetičke energije na puknuće i plastične deformacije broda. Najvažnija idealizacija je da se u obzir uzimaju samo poniranje, posrtanje i zaošijanje te da je utjecaj hidrodinamičkih sila pri akceleraciji broda aproksimiran samo pomoću koeficijenata dodanih masa. Za vanjsku dinamiku, analitičke metode su razvijene za gubitak kinetičke energije i sudarne impulse u sudaru brod-brod, u sudaru broda sa plutajućim predmetima, u sudaru broda s krutim zidom i u sudaru broda s offshore platformama. Brodovi u tom smislu mogu biti bilo koji tip plovila bez ograničenja veličine broda, brzine sudara, mjesta i kuta sudara.

Unutarnja mehanika se bavi odzivima koji se pojave uslijed sudara i deformacijama na boku udarenog broda i pramcu udarajućeg broda.

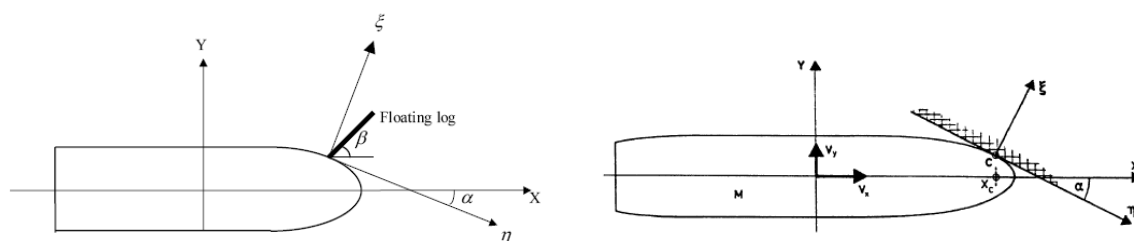
2.2. Vanjska dinamika broda prilikom sudara

Svrha provođenja proračuna vanjske dinamike je računanje impulsa koji se javljaju prilikom sudara i energije sudara koja se troši za puknuće i plastične deformacije strukture broda. Analiza gibanja broda se provodi u ravnini na slobodnoj površini.

Na slikama 6. i 7. prikazani su primjeri najučestalijih scenarija za sudar broda s pripadajućim koordinatnim sustavima.



Slika 6. Sudar brod – brod i sudar brod – plutajući kontejner, [6]



Slika 7. Sudar brod – plutajuće deblo i brod – čvrsti zid, [6]

Kada računamo sudar dvaju sličnih brodova, uzimamo u obzir sljedeće:

Udarajući brod (A)

- V_{ax} – brzina napredovanja
- V_{ay} – brzina zanošenja.

Udareni brod (B)

- V_{b1} – brzina napredovanja
- V_{b2} – brzina zanošenja

Tri koordinatne osi (slika 8.):

Glavna koordinatna os:

- X – smjer kretanja udarajućeg broda prema pramcu
- Y – postavljena na polovici udarajućeg broda

Koordinatna os udarajućeg broda:

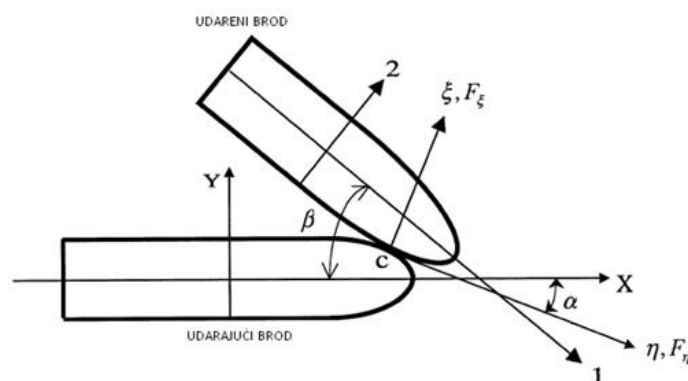
- 1 – smjer kretanja udarenog broda prema pramcu
- 2 – postavljena na polovici udarenog broda

Koordinatna os sudara u točki C:

- ξ – smjer normale na udarnu površinu

i dva kuta:

- α – kut između x i η osi
- β – kut između x i 1 osi



Slika 8. Sudar dvaju sličnih brodova, [6]

Gubitak kinetičke energije određuje se na sljedeći način, [6]:

1. Postavljaju se jednačbe gibanja udarajućeg i udarenog broda zbog sile udara:

2. Određuje se ubrzanje i relativno ubrzanje sudara



3. Određuju se relativne brzine prije i nakon sudara oba broda

- na kraju sudara pretpostavljamo da se brodovi odbijaju jedan od drugog, tj.

Gdje je e koeficijent restitucije, za potpuno plastične sudare $e=0$, a za potpuno elastične $e=1$

4. Računaju se impulsi udara

$$\begin{aligned} & \text{_____} \\ & \text{_____} \end{aligned}$$

5. Iz omjera impulsa udara određuje se koeficijent trenja

$$\text{_____}$$

- potrebno je odrediti koeficijent trenja kako bismo odredili jesu li brodovi priljubljeni ili klize jedan uz drugoga. Ako je koeficijent trenja određen kao μ_0 onda:

$|\mu_0| \geq |\mu|$ - brodovi su priljubljeni,

$|\mu_0| \leq |\mu|$ - brodovi klize jedan uz drugog.

6. Određuje se gubitak kinetičke energije

- Slučaj klizanja

$$\text{_____}$$

- Slučaj priljubljanja

- Koeficijenti dodane mase

Koeficijenti dodane mase m_{ax} , m_{ay} , j_a i m_{b1} , m_{b2} , j_b uzimaju u obzir djelovanje okolne vode na brodove, ovisno o formi broda, trajanju sudara, itd.

Radi pojednostavljenja uzima se:

$$m_{ax} = m_{b1} = 0.05$$

$$m_{ay} = m_{b2} = 0.85$$

$$j_a = j_b = 0.21$$

Kod sudara dvaju sličnih brodova kut i mjesto udara imaju značajan utjecaj na gubitak kinetičke energije, tako će gubitak energije biti veći ako se sudar dogodi na prednjem dijelu udarenog broda, te ako je kut α što veći. To znači da postoji veći rizik oštećenja na prednjem dijelu broda.

Udar kontejnera ili grane, koji plutaju u moru, u brod uzrokuje veći gubitak energije od slučaja kada dolazi samo do trenja.

Kod sudara brod-kruti zid kada je kut sudara manji od 50° ($\mu_0 = 0,6$), brod će klizati o zid, a kada je veći od ($\mu_0 = 0,6$), brod gubi kinetičku energiju.

2.3. Unutarnja mehanika brodskih sudara

Unutarnja mehanika bavi se deformacijama na boku udarenog broda i pramcu udarajućeg broda. Vrlo je teško ostvariti precizne proračune unutarnje mehanike, budući je čvrstoća broda određena složenom vezom između izvijanja, popuštanja, napetosti, kidanja, pucanja te krhkih lomova materijala. Promatranja stvarnih nesreća brodova i eksperimentalnih modela otkrivaju glavne mehanizme apsorpiranja energije bočne strukture koji su:

- Deformacija oplata i uzdužnjaka
- Preklap i gnječenje rebara i uzdužnih ukrepa
- Preklap, rezanje i gnječenje horizontalnih paluba
- Rezanje i gnječenje dna broda
- Gnječenje pregrada

Metode za analizu strukturnog oštećenja u sudaru broda možemo podijeliti u 4 kategorije:

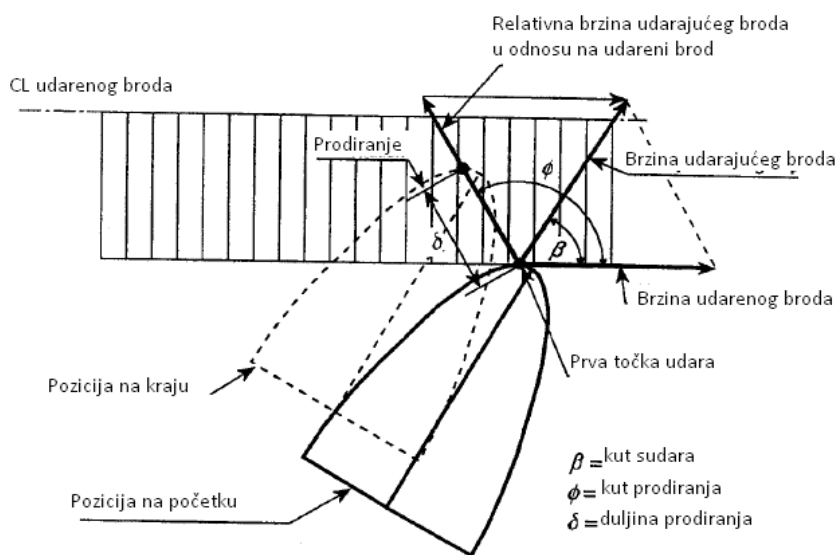
- Empirička metoda – Minorsky je 1959. izveo 29 pokusa na temelju kojih je dobio empiričku formulu za apsorpiranu energiju
- Metoda konačnih elemenata (Finite Element Method) – čest pristup ovakvim analizama, smatra se da MKE daje precizne konačne rezultate te u nekim slučajevima može i zamijeniti izvođenje pokusa,
- Metoda izvođenja pokusa – od 1960ih do danas izveli su se mnogi pokusi sudara brodova, najviše u Italiji, Njemačkoj i Japanu. Posljednjih godina većinom se izvode statički pokusi sudara budući ih je jednostavnije kontrolirati od dinamičkih.
- Simplificirana metoda – osnovna pretpostavka ove metode je da među različitim strukturnim dijelovima nema interakcije, već da pojedinačno pridonose sudaru. [6]

2.3.1. Smjer prodiranja pramca

Scenarij sudara ovisi o smjeru prodiranja pramca koji može biti pod različitim kutevima. Kut prodiranja Φ se definira kao kut između smjera prodiranja i smjera napredovanja udarenog broda i može se odrediti kao:

— — — — —

Na slici 9. prikazan je sudar dvaju brodova u kojem je naznačen kut sudara, kut prodiranja pramca te duljina prodiranja.

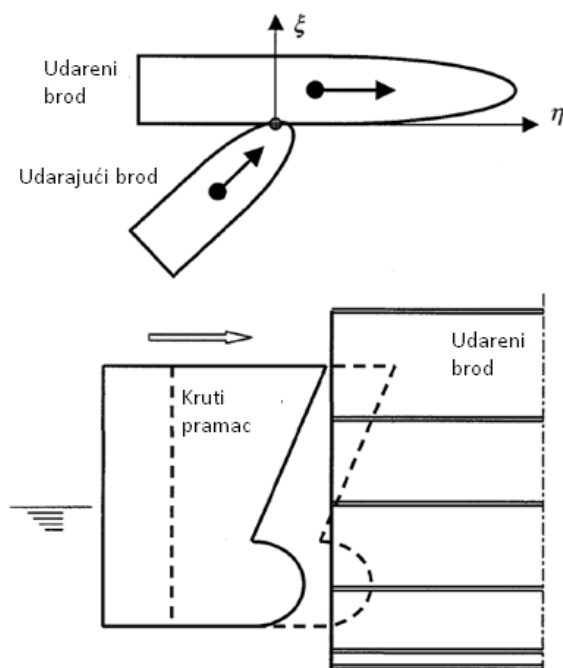


Slika 9. Scenarij sudara brod-brod i smjer prodiranja, [6]

Za posebne slučajeve kut prodiranja je:

- Ako je brzina udareno broda nula $V_2 = 0 \rightarrow \Phi = \beta$
- Kada je brzina dva broda jednaka $V_1 = V_2 \rightarrow \Phi = 90^\circ + \beta/2$

Na slici 10. prikazana je brzina u točki sudara te bočni prikaz prodiranja pramca u udareni brod.



Slika 10. Brzina u točki sudara, bočni prikaz prodiranja pramca, [6]

Brzina u točki sudara računa se prema:

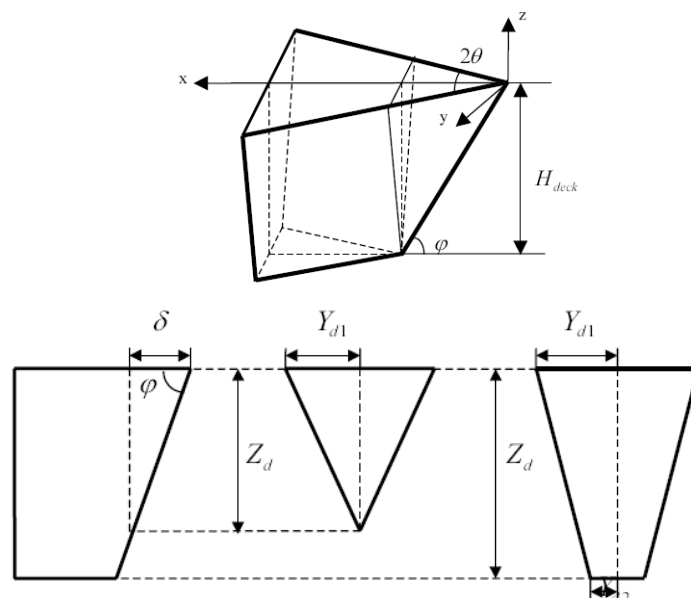
- za $t = 0$

- za $t = t_{\Delta}$

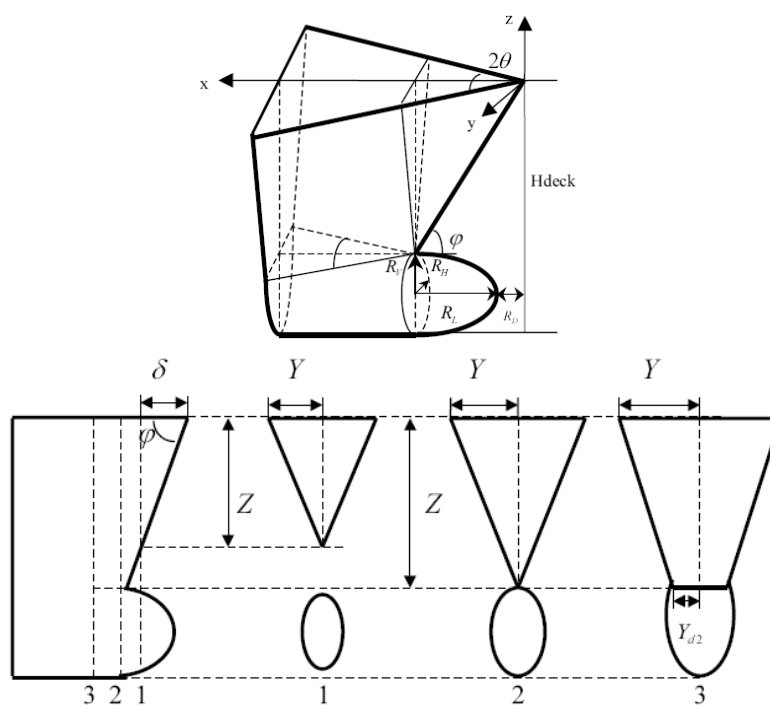
gdje je t_{Δ} vrijeme trajanja sudara

2.3.2. Geometrija pramca udarajućeg broda

Geometrija pramca udarajućeg broda važan je podatak u analizi sudara metodom konačnih elemenata. Naravno, geometrija je pojednostavljena i podjeljena u dva glavna oblika, konvencionalni pramac i pramac sa bulbom. Na sljedećim slikama prikazane su geometrije tih pramaca.



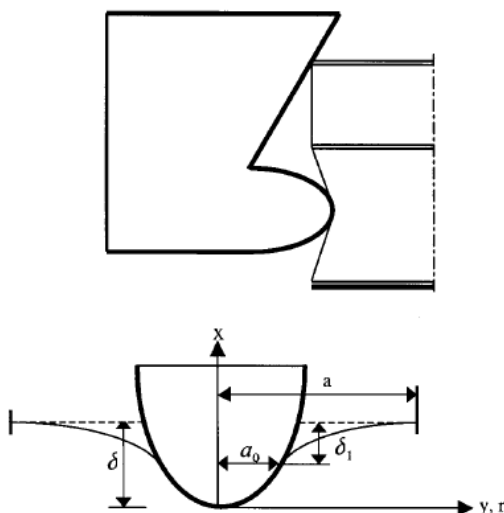
Slika 11. Geometrija konvencionalnog pramca



Slika 12. Geometrija pramca s bulbom

2.3.3. Deformacija bočne stijenke udarenog broda

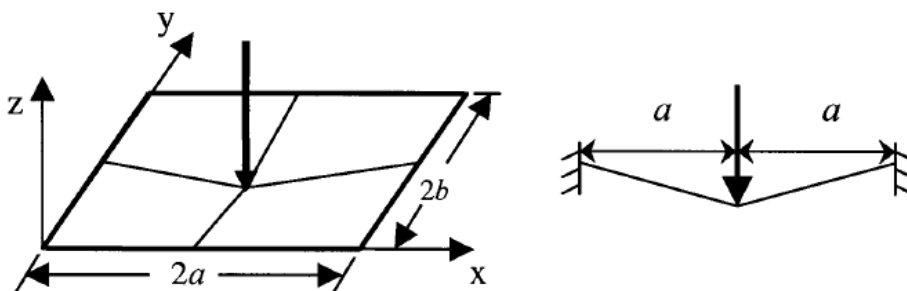
U slučaju sudara, pramac udarajućeg broda oštećuje ili deformira bok udarenog broda. Na sljedećoj slici dan je geometrijski prikaz sudara sa pramcem kod kojeg je modeliran bulb.



Slika 13. Udarajući pramac s bulbom oštećuje bok udarenog broda

Posebno se promatra analiza bulba i analiza gornjeg dijela pramca.

Kod analize bulba problem se razlaže na jednostavnije primjere. Najprije se u razmatranje uzima deformacija pravokutne oplata podložene vanjskom opterećenju kako je vidljivo na sljedećoj slici.

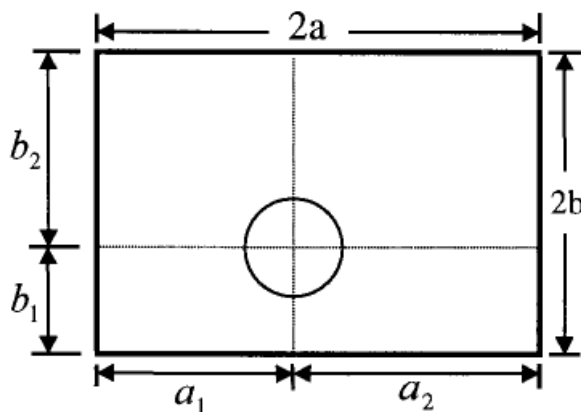


Slika 14. Deformacija oplata uslijed koncentrirane sile

Energija koju oplata apsorbira u ovom slučaju može se računati iz izraza:

$$E = \frac{1}{2} \rho v^2 A_s$$

Na slici 15. prikazan je slučaj udara bulba u oplatu.



Slika 15. Pramčani bulb udara oplatu ekscentrično

U tom slučaju dani su sljedeći izrazi za silu i energiju:

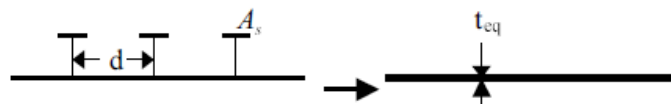
$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 A_s$$

$$E = \frac{1}{2} \rho v^2 A_s$$

U praksi oplata na boku nije zasebna, obično se ukružuje uzdužnjacima. Prema tome ekvivalentna debljina se računa na sljedeći način:

$$t_{eq} = t_p + A_s / d$$

gdje je t_{eq} ekvivalentna debljina oplata, t_p debljina oplata, A_s površina uzdužnjaka, a d razmak između uzdužnjaka prikazano na slici 16.



Slika 16. Ekvivalentna debljina ukrepljene oplata

U slučaju ukrepljene oplata odnos sila-progib i odnos energija-progib dana je izrazima:

$$\frac{F}{\delta} = \frac{F_s}{\delta_s} \quad \frac{E}{\delta} = \frac{E_s}{\delta_s}$$

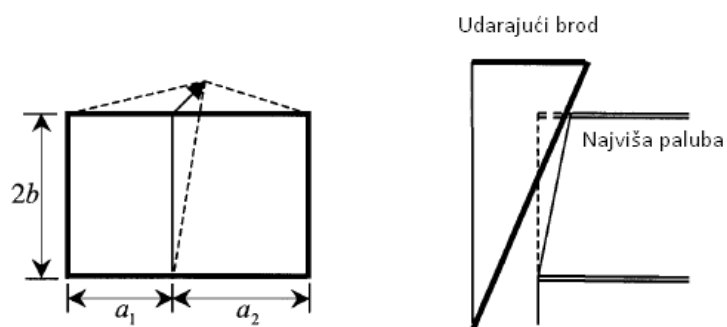
$$\frac{F}{\delta} = \frac{F_s}{\delta_s} \quad \frac{E}{\delta} = \frac{E_s}{\delta_s}$$

gdje je t_{px} i t_{py} ekvivalentna debljina ukrepljene oplata u smjeru x , odnosno y .

U slučaju kad je mjesto sudara najviša paluba udarenog broda prikazano na slici 17., odnos sila-progib i odnos energija-progib dana je izrazima:

$$\frac{F}{\delta} = \frac{F_s}{\delta_s} \quad \frac{E}{\delta} = \frac{E_s}{\delta_s}$$

$$\frac{F}{\delta} = \frac{F_s}{\delta_s} \quad \frac{E}{\delta} = \frac{E_s}{\delta_s}$$



Slika 17. Mjesto sudara na najvišoj palubi udarenog broda

3. METODA KONAČNIH ELEMENATA

3.1. Uvod

Metoda konačnih elemenata spada u suvremene metode numeričke analize. Njezina primjena prvo je počela u oblasti proračuna inženjerskih konstrukcija. Osnovna ideja o tzv. fizičkoj diskretizaciji kontinuuma, na kojoj se zasniva MKE je vrlo stara, otprilike koliko i ljudsko nastojanje da se teško rješivi problemi zamjene jednostavnijim.

Kao primjer za ilustraciju može se navesti problem određivanja opsega ili površine kruga. Grčki matematičar i fizičar Arhimed, računao je broj π , odnosno granice između kojih se nalazi numerička vrijednost ovog broja na taj način što je konturu kruga aproksimirao upisanim odnosno opisanim poligonom sa konačnim brojem stranica. Povećanjem broja stranica poligona, odnosno smanjivanjem njihove dužine, smanjivala se i razlika između granica u kojima se nalazi broj π , a povećavala točnost njegove numeričke vrijednosti.

Sa ovim prvim jednostavnim primjerima, otvorena su neka fundamentalna pitanja, kao što su: točnost rješenja, gornja i donja granica aproksimacije, monotonost i brzina konvergencije i dr. koja su i danas u MKE veoma aktualna i značajna sa teoretskog i praktičnog stajališta.

3.2. Osnove metode konačnih elemenata (MKE)

Metoda konačnih elemenata spada u metode diskretne analize. Za razliku od ostalih numeričkih metoda, koje se zasnivaju na matematičkoj diskretizaciji jednadžbi graničnih problema, MKE se zasniva na fizičkoj diskretizaciji razmatranog područja. Umjesto elementa diferencijalno malih dimenzija, osnovu za sva proučavanja predstavlja dio područja konačnih dimenzija, manje područje ili konačni element. Zbog toga su osnovne jednadžbe pomoću kojih se opisuje stanje u pojedinim elementima, a pomoću kojih se formulira i problem u cjelini, umjesto diferencijalnih ili integralnih, obične algebarske.

Sa stajališta fizičke interpretacije, to znači da se razmatrano područje, kao kontinuum sa beskonačno mnogo stupnjeva slobode, zamjenjuje diskretnim modelom međusobno povezanih konačnih elemenata, sa konačnim brojem stupnjeva slobode. Obzirom na to da je broj diskretnih modela za jedan granični problem neograničeno veliki, osnovni zadatak je da se izabere onaj model koji najbolje aproksimira odgovarajući granični problem.

Suština aproksimacije kontinuuma po MKE, sastoji se u sljedećem [7]:

1. Razmatrano područje kontinuuma, pomoću zamišljenih linija ili površina, dijeli se na određeni broj manjih područja konačnih dimenzija. Pojedina manja područja se nazivaju konačni elementi, a njihov skup za cijelo područje sustav ili mreža konačnih elemenata.
2. Pretpostavlja se da su konačni elementi međusobno povezani u konačnom broju točaka, koje se usvajaju na konturi elementa. Te točke se nazivaju čvorne točke ili čvorovi.
3. Stanje u svakom konačnom elementu (npr. polje pomaka, deformacija, naprezanja, rasprostiranja temperature i sl.) opisuje se pomoću interpolacionih funkcija i konačnog broja parametara u čvorovima koji predstavljaju osnovne nepoznate veličine u MKE.
4. Za analizu i proračun sustava konačnih elemenata važe svi principi i postupci koji važe za klasične diskretne sustave.

3.3. Različiti pristupi izvođenju osnovne jednadžbe u metodi konačnih elemenata

Prema načinu na koji se izvode i formuliraju osnovne jednadžbe MKE, odnosno jednadžbe za pojedine konačne elemente, postoje četiri osnovna aspekta MKE i to: direktna metoda, varijabilna metoda, metoda reziduumata i metoda ravnoteže energija [7].

Direktna metoda je analogna metodi deformacije u proračunu linijskih nosača. Ova metoda se može koristiti kod relativno jednostavnih problema, a pogodna je zbog jasnog geometrijsko - mehaničkog značenja pojedinih koraka aproksimacije.

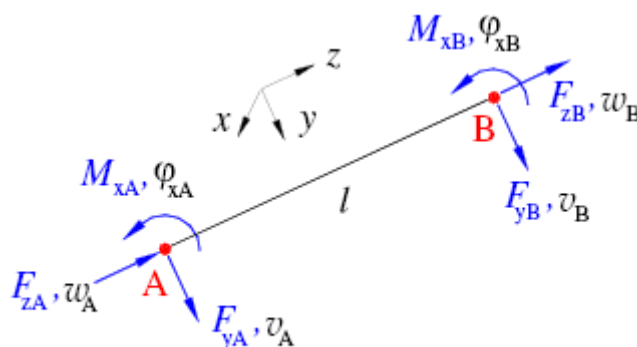
Varijabilna metoda se zasniva na principu o stacionarnosti funkcija. U problemima mehanike čvrstog tijela, funkcija je obično potencijalna odnosno komplementarna energija sustava ili se funkcija formulira na osnovu dvije energije: Hellinger- Reissner i Hu-Washizy. Za razliku od direktne metode, koja se može primijeniti samo na elemente sasvim jednostavnog oblika, varijabilna metoda se podjednako uspješno primjenjuje na elemente jednostavnog i elemente složenog oblika.

Metoda reziduuma je opći aspekt aproksimacije po MKE, koji se zasniva na diferencijalnim jednačinama razmatranog problema.

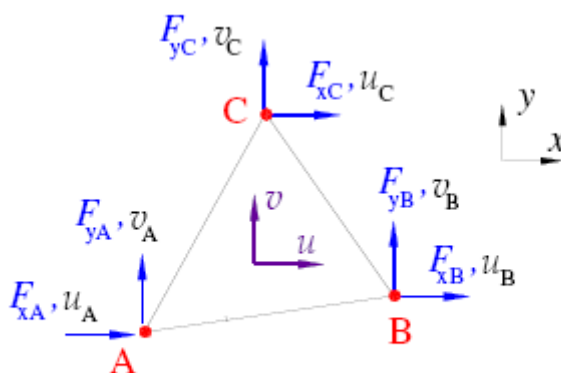
Metoda ravnoteže energija zasniva se na ravnoteži različitih aspekta energije i ima primjenu u termostatičkoj i termodinamičkoj analizi kontinuuma.

Od navedenih aspekata MKE, u mehanici čvrstih deformacijskih tijela od posebnog su značaja varijabilna metoda i metoda reziduuma, koje u području primjene predstavljaju dvije komplementarne metode podjednake točnosti.

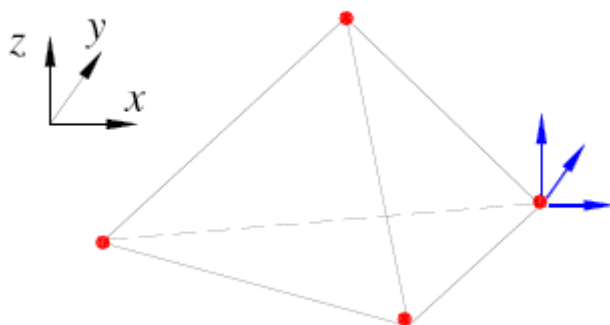
Konačni elementi mogu biti linijski, plošni ili trodimenzionalni, kako je prikazano slikom 18., slikom 19. i slikom 20.



Slika 18. Linijski konačni element



Slika 19. Plošni konačni element



Slika 20. Trodimenzionalni konačni element

Osnovna jednađžba konačnog elementa dana je formulom:

gdje je

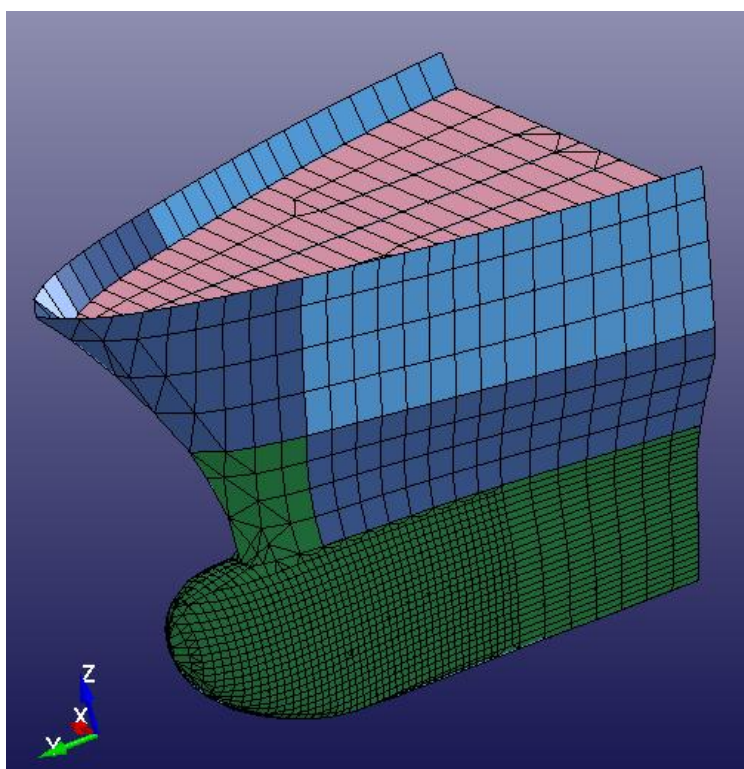
-matrica krutosti e-tog konačnog elementa
-vektor čvornih pomaka e-tog konačnog elementa
-vektor čvornih sila e-tog konačnog elementa

4. NUMERIČKI MODELI ZA ANALIZU SUDARA

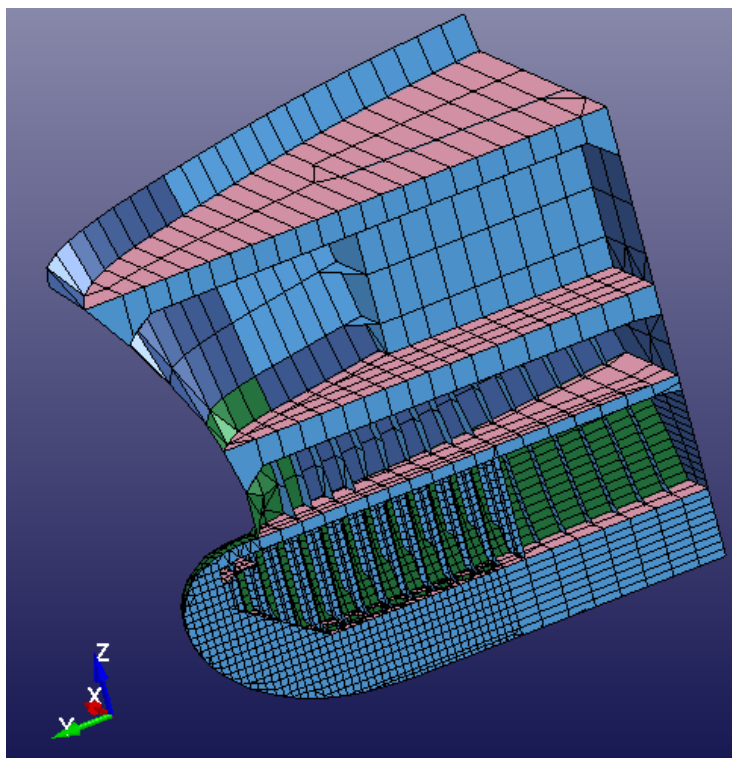
4.1. Brod 1 – udarajući brod

4.1.1. Opis modela

U ovoj analizi korišten je već postojeći model broda koji je prilagođen potrebama proračuna sudara. Model broda sastoji se od pramca modeliranog u verziji grube i fine mreže te grednih elemenata koji zamjenjuju trup broda. Pramac je modeliran korištenjem programa *Femap – Finite Element Modeling And Postprocessing, Version 9.3.0.* pri čemu su osnovni ulazni podaci bili su točke rebara (x, y i z) broda *Marko Polo* u dužini od 15.725 m što iznosi 25 pramčanih rebara [8]. Na slici 21. prikazan je modelirani pramac broda kod kojeg je finije izrađena mreža konačnih elemenata na bulbu, kao kritičnog područja sudara. Na slici 22. prikazan je presjek kroz pramac kako bi se vidjela cjelokupna struktura udarajućeg pramaca.



Slika 21. Fina mreža pramca udarajućeg broda

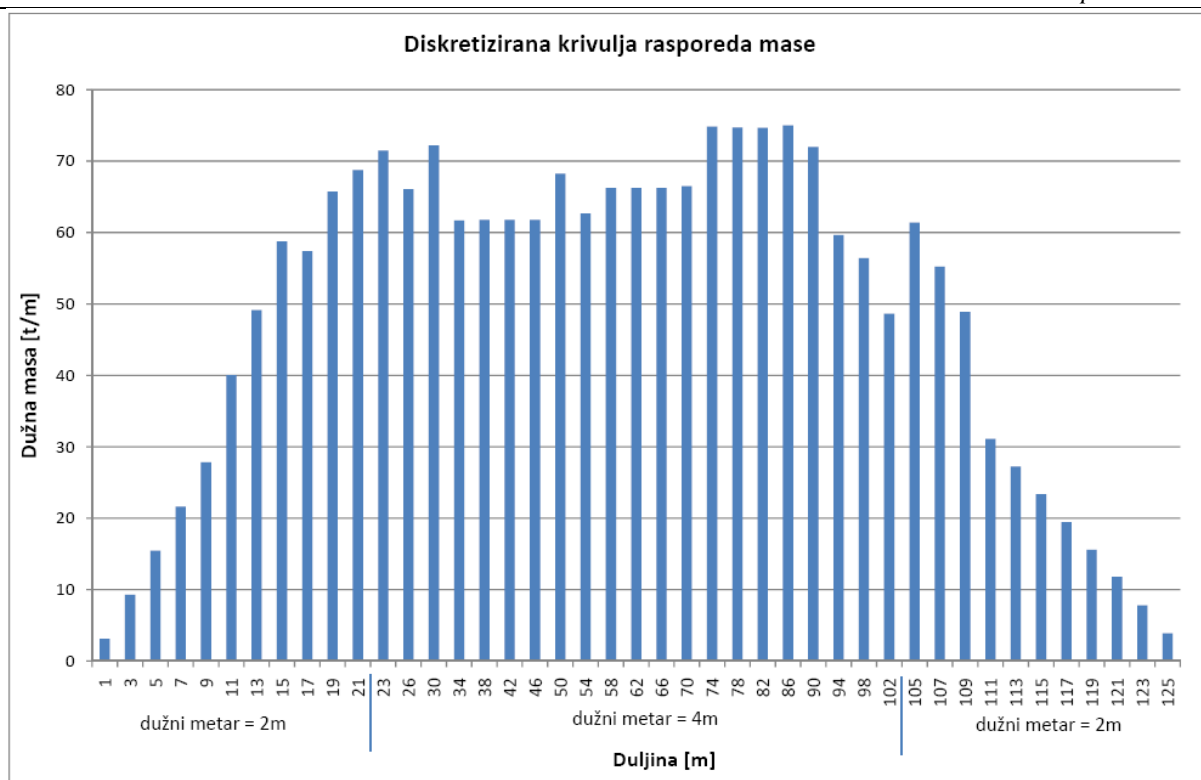


Slika 22. Presjek pramca udarajućeg broda

Za izradu mreže konačnih elemenata korišteni su dvodimenzionalni (PLATE) elementi sa tri i četiri čvora po elementu.

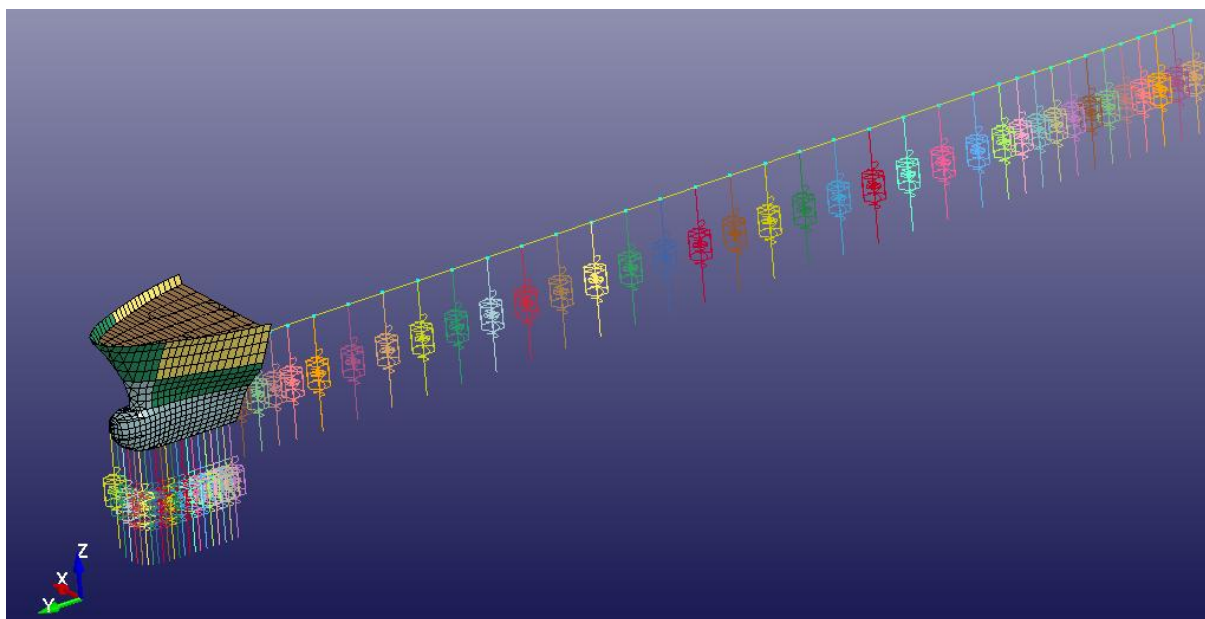
Poprečna pregrada se nalazi na 111.725 m gledano od krme. Budući da je svrha poprečne pregrade osiguravanje dovoljne krutosti, korišten je materijal beskonačne krutosti (RIGID) koji ne prenosi naprezanja, dok mu je smanjivanjem gustoće smanjena ukupna masa kako ne bi imala utjecaja na daljnji tijek proračuna.

Trup broda modeliran je kao gredni model podijeljen na 36 konačnih elemenata. Gredni konačni elementi su modelirani tako da svaki element ima isti poprečni presjek, $A = 2.12\text{m}^2$, što se odnosi na vrijednost poprečnog presjeka glavnog rebra. Variranjem gustoća pojedinih greda ispoštovan je konstantan presjek glavnog rebra. Diskretizacijom krivulje rasporeda mase, vidljivoj na slici 23., dolazi se do vrijednosti masa za pojedino rebro. Vrijednosti diskretiziranih masa pomnoženih sa dužnim metrom daju vrijednosti stvarnih masa u tom dužnom dijelu broda, koncentriranih u čvorovima u kojima se spajaju gredni elementi [8].



Slika 23. Diskretizirana krivulja rasporeda mase, [8]

Na slici 24. prikazan je model udarajućeg broda u cjelosti, sa pramcem, grednim elementima, koncentriranim masama te oprugama.



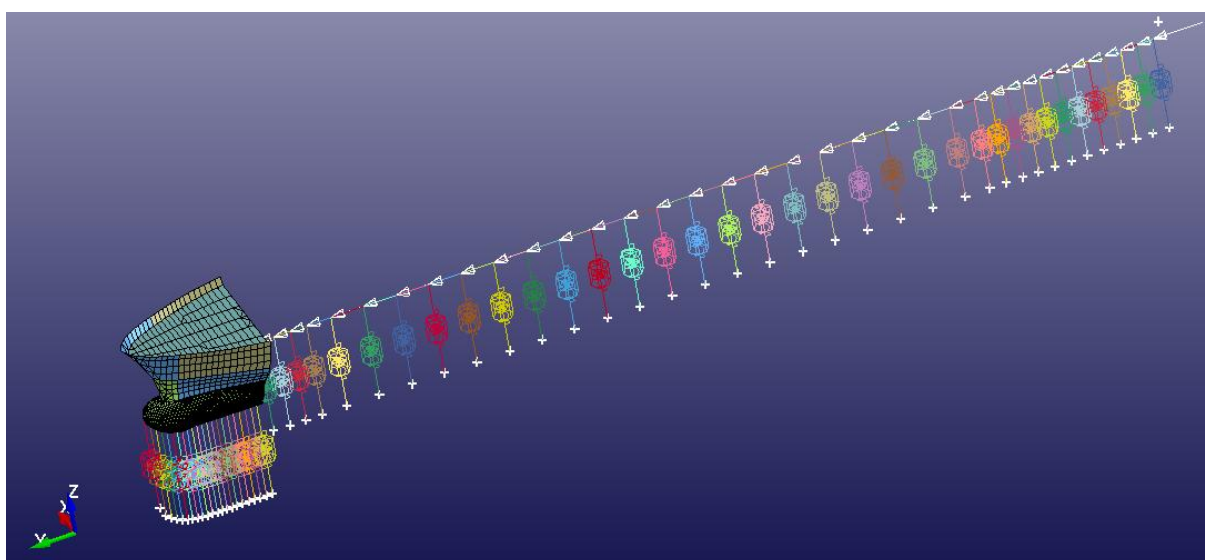
Slika 24. Pramac udarajućeg broda, gredni elementi i opruge

Opruge koje se nalaze na modelu zamjenjuju hidrodinamičke sile uslijed uzgona. Za određivanje uzgonskih sila koje djeluju na brod potrebno je odrediti volumen pojedine vrpce. Svaka vrpca ima poprečni presjek (ravnina yz) čija je površina jednaka površini rebra na određenoj duljini. Da bi se dobio volumen, potrebno je površinu pomnožiti sa pripadajućom širinom vrpce b . Forma broda je podijeljena na ukupno 58 vrpca, a širine b su odabrane proizvoljno tako što su u području krme i pramca odabrane manje širine u odnosu na paralelni srednjak zbog brže promjene površine poprečnog presjeka rebra [8]. Množenjem izračunatih volumena sa gravitacijom $g = 9.81 m/s^2$ i gustoćom morske vode $\rho = 1025 kg/m^3$ došlo se do vrijednosti sila uzgona F_u za položaje x po duljini broda.

Sveukupna masa modela u balasnom stanju je $m=6889 t$, sa koordinatama težišta $LCG=61,082 m$ i $VCG=8,388 m$.

4.1.2. Rubni uvjeti i opterećenja

Čvorovima i elementima pramca udarajućeg broda nisu spriječeni pomaci i rotacije niti u jednom smjeru. Donjim čvorovima opruga postavljeni su rubni uvjeti potpunog uklještenja, odnosno spriječeni su im pomaci i rotacije u svim smjerovima kako bi se zadanom naredbom gibalili točno onako kako se gibaju gornji čvorovi opruga koji su povezani sa grednim elementima broda. Na slici 25. bijelim križićima su označeni rubni uvjeti u donjim čvorovima opruga, a bijelim strelicama narinuto opterećenje. Budući se udarajući brod treba gibati u smjeru osi y , svaki čvor grednih elemenata opterećen je silom u tom smjeru..



Slika 25. Udarajući brod sa označenim rubnim uvjetima i opterećenjima

4.2. Brod 2 – udareni brod

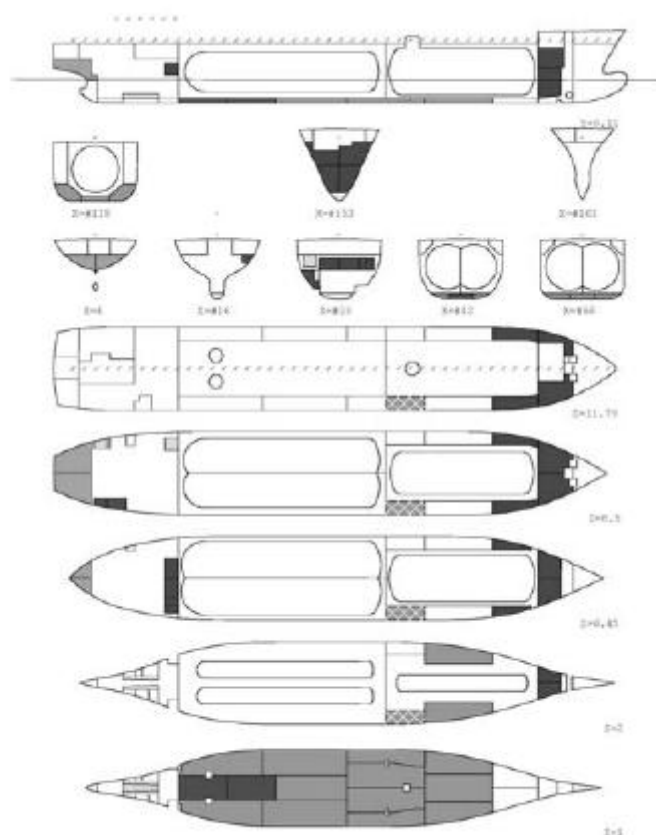
4.2.1. Opće značajke udarenog broda

Udareni brod je LPG tanker sa spremnikom tipa C.

Prema Knjizi trima i stabiliteta za navedeni brod, stanje krcanja balast odgovara trećem slučaju opterećenja (LC03: Ballast Departure). Tablica 3. prikazuje osnovne podatke, a slika 27. shematski prikazuje stanje krcanja broda u balastu. [2]

Tablica 3. Brod u balastu, osnovni podaci, [2]

| | |
|---|-------------|
| Masa praznog broda | 3607 tona |
| Masa tereta | 2148.6 tona |
| Istisnina (pri 1.025 t/m ³) | 5755.6 tona |
| Gaz na krmi | 4.85 m |
| Gaz na pramcu | 4.59 m |
| Srednji gaz | 4.71 m |
| Položaj težišta broda po visini | 4.31 m |
| Položaj težišta broda po dužini | 63.74 m |



Slika 26. Brod u balastu, shematski prikaz, [2]

4.2.2. Opis modela i njegova prilagodba LS-Dyna softveru

LPG tanker modeliran je u softveru *SESAM*. Budući se analiza vrši u softveru *LS-Dyna*, bilo je potrebno prilagoditi zapis modela. Postupak je najprije zahtijevao prepoznavanje pojedinih zapisa u oba softvera. Nakon što su pronađeni svi potrebni podaci, potonji su iz *SESAM-a* uspješno prebačeni u zapis prepoznatljiv *LS-Dyna* softveru pomoću petlji u programu *Mathematica*. Bilo je potrebno pronaći zapis čvorova, pločastih elemenata, grednih elemenata, vektora orijentacije i ekscentriciteta pojedinog grednog elementa te materijala. Kako je prebacivanje čvorova najjednostavniji primjer, približim objašnjenjem prebacivanja jednog čvora iz *SESAM-a* u *LS-Dyna-u*, približen je postupak prebacivanja cijelog modela. Svaki čvor točno je smješten u Kartezijevom koordinatnom sustavu. Stoga, da bi ga se potpuno odredilo, potrebno je znati njegove koordinate u smjeru pojedine osi. U *SESAM-u* je to zapisano na sljedeći način:

| Nodal Coordinates | | | | | GCOORD |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| GCOORD | NODENO | XCOORD | YCOORD | ZCOORD | |

Slika 27. Kartica kojom se definiraju čvorovi u *SESAMU*, [9]

gdje su:

NODENO - interni broj čvora

XCOORD - koordinata čvora u smjeru osi x

YCOORD - koordinata čvora u smjeru osi y

ZCOORD - koordinata čvora u smjeru osi z

LS-Dyna na gotovo identičan način traži zapis čvorova, jedina razlika je u oznakama pojedinih varijabli. Slijedi prikaz tražene kartice podataka:

| Card 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|------|----|----|----|----|----|---|---|---|----|
| Variable | NID | X | Y | Z | TC | RC | | | | |
| Type | I | F | F | F | F | F | | | | |
| Default | none | 0. | 0. | 0. | 0. | 0. | | | | |
| Remarks | | | | | | 1 | 1 | | | |

Slika 28. Kartica kojom se definiraju čvorovi u *LS-Dyna-i*, [10]

gdje su:

NID - broj čvora

X - koordinata čvora u smjeru osi x

Y - koordinata čvora u smjeru osi y

Z - koordinata čvora u smjeru osi z

Slijedi primjer kodiranja jednog čvora sa pripadajućim podacima iz *SESAM*-ovog u *LS-Dyna* zapis:

SESAM

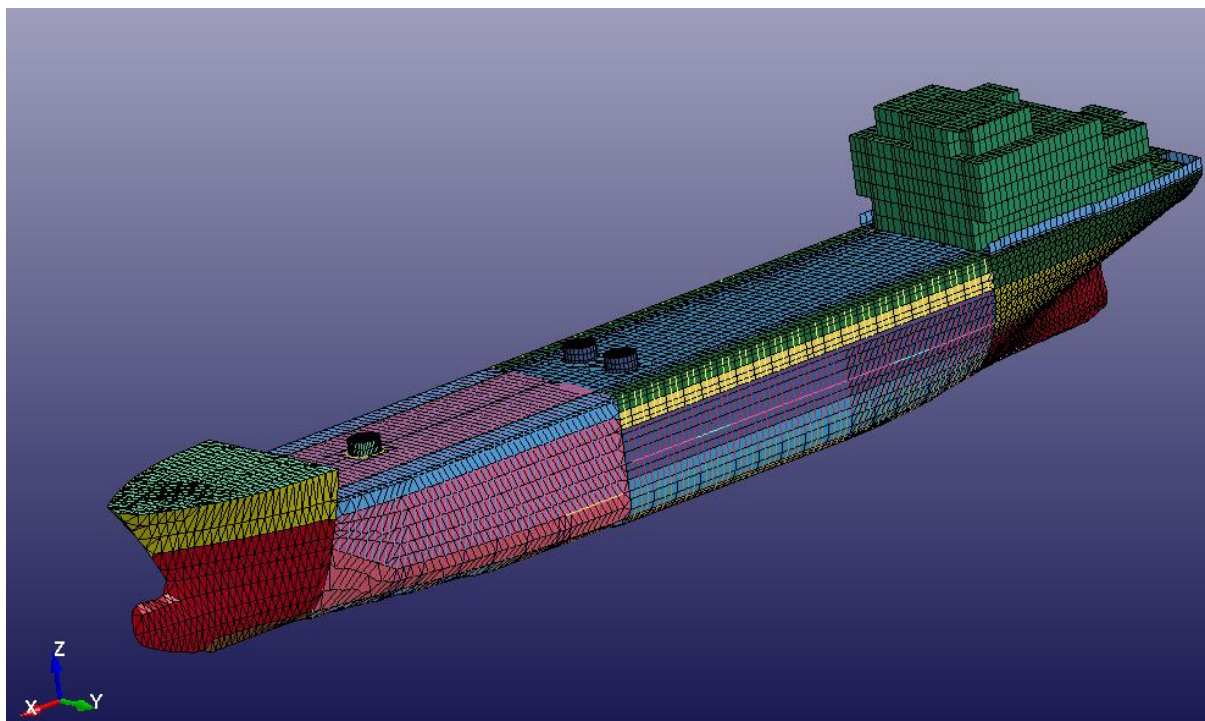
GCOORD 1.00000000E+00 6.50999985E+01 -8.39999962E+00 1.15299997E+01

LS-Dyna

*NODE

| \$# | nid | x | y | z |
|-----|-----|------------|-------------|----------|
| | 1, | 65.099998, | -8.3999996, | 11,52999 |

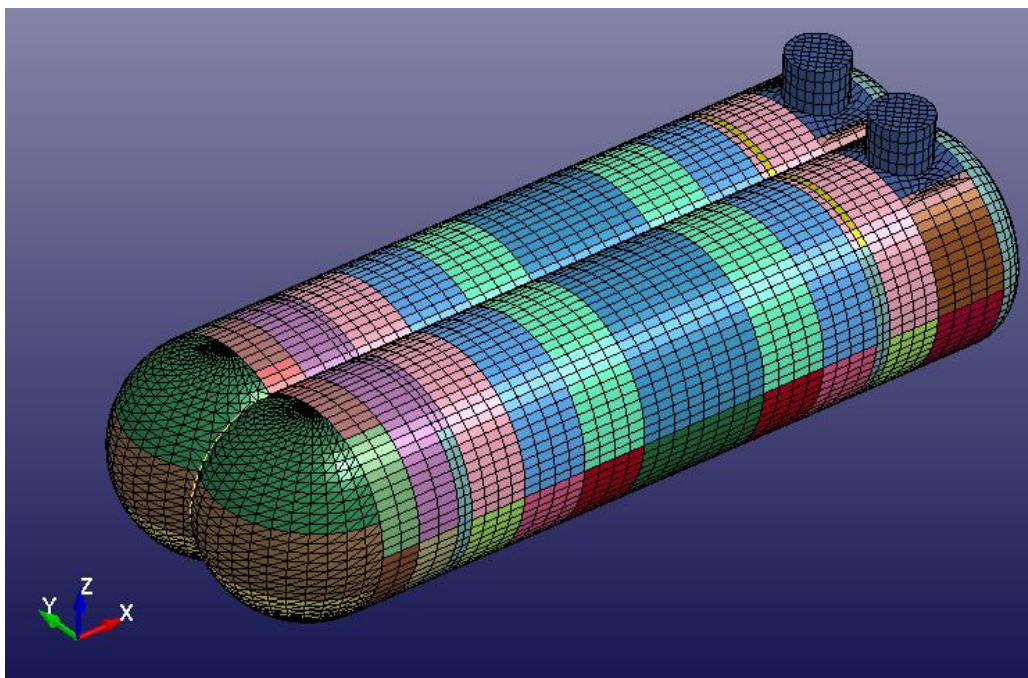
Kako se radi o velikom broju opetovanih radnji, napisane su petlje u programu *Mathematica* pomoću kojih su se iz *SESAM*-ovog zapisa izdvajali potrebni podaci, a potom novim petljama slagali u *LS-Dyna* zapis. Cjelokupni model broda prikazan je slikom 29.



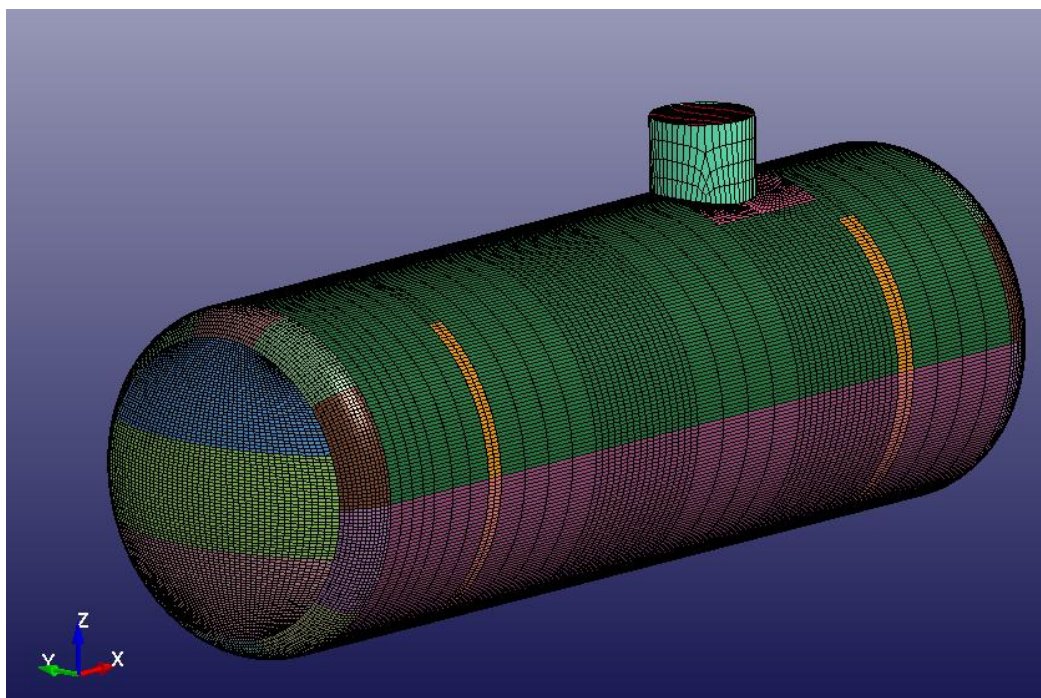
Slika 29. Model LNG tankera

Model se sastoji od sedam superelemenata: pramac, krma, nadgrađe te dva srednja dijela koja nose cilindrični i dvodijelni spremnik.

Navedeni dijelovi su vidljivi na slici 29., osim spremnika koji su prikazani zasebno na slici 30. i slici 31.

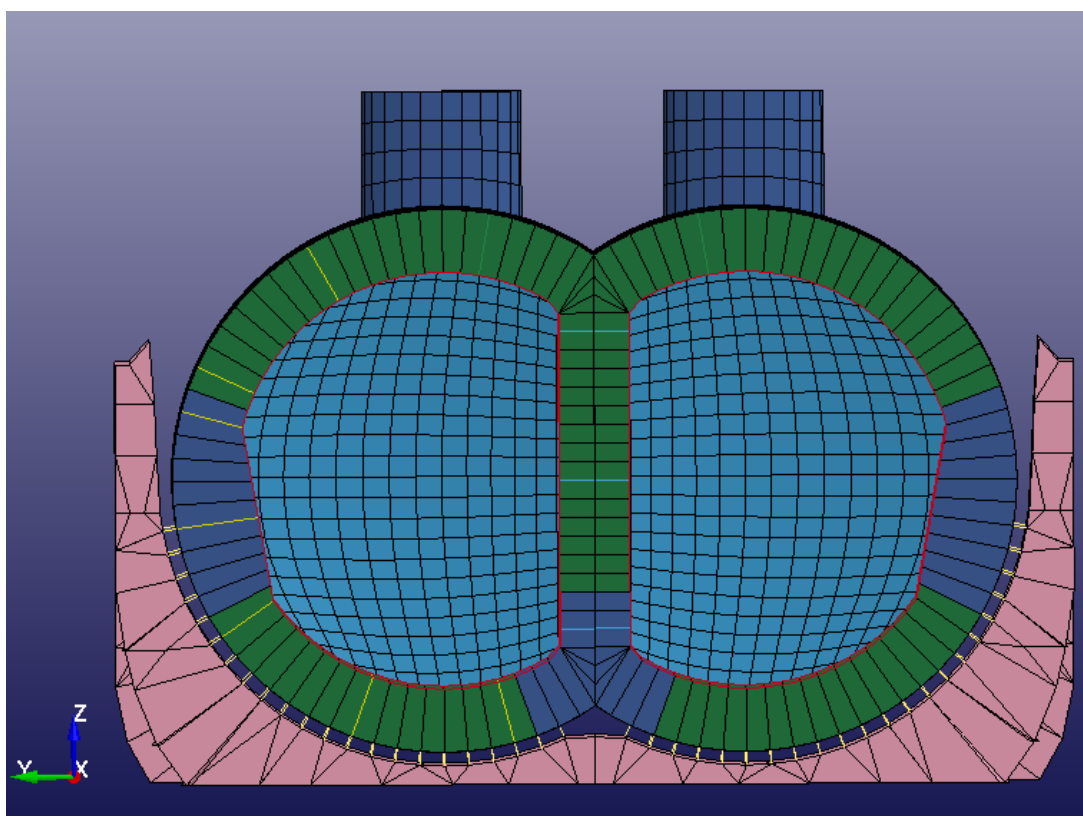


Slika 30. Dvodijelni (bi-lobe) spremnik LNG tankera



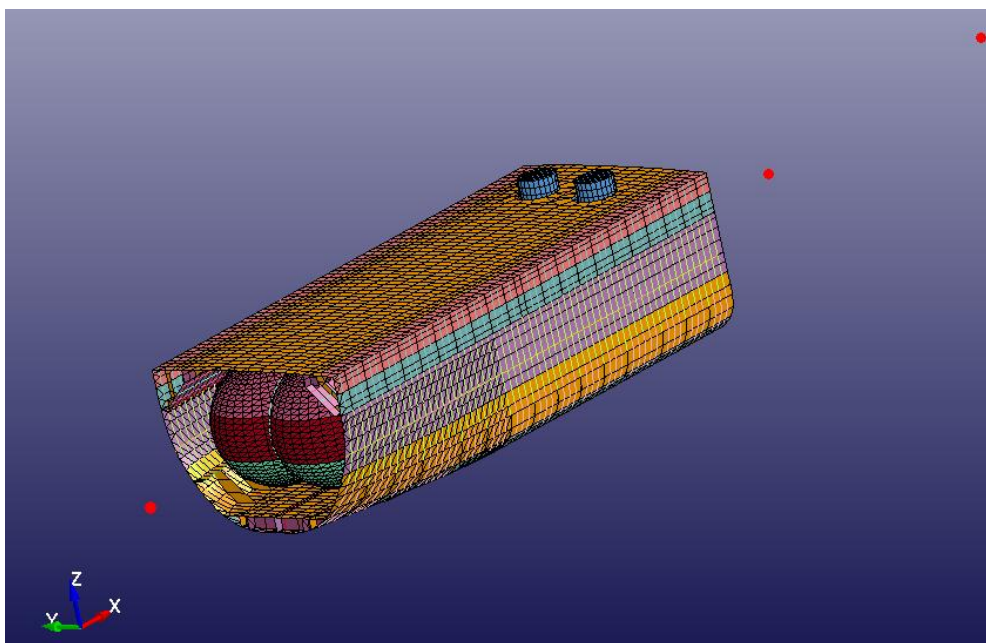
Slika 31. Cilindrični spremnik LNG tankera

Cjelokupni model modeliran je grednim i pločastim elementima definiranim sa tri ili četiri čvora. Spremnici imaju vidljive prstene ojačanja na mjestima na kojima su spojeni sa strukturom broda. Originalno su spremnici za brodsku konstrukciju bili spojeni oprugama, no u svrhu proračuna su opruge zamijenjene grednim elementima uslijed pretpostavke da bi opruge mogle ometati dinamičku analizu sudara. Gredni elementi kružnog su presjeka, dimenzionirani obzirom na krutost koju su posjedovale opruge. Na slici 32. prikazan je presjek kroz dvodijelni spremnik na kojoj su žutom bojom označeni gredni elementi koji spajaju spremnik sa brodom strukturom dvodna.



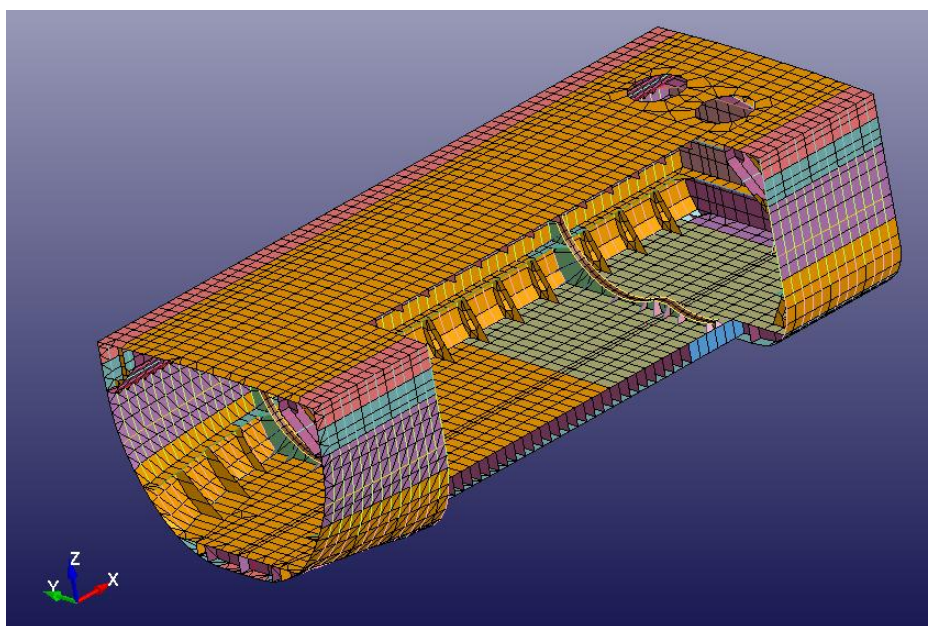
Slika 32. Presjek kroz spremnik, dvodno i gredni elementi koji spajaju spremnik sa brodom strukturom

Obzirom da čitav brod sadrži veliki broj konačnih elemenata što značajno povećava vrijeme trajanja proračuna, model je prilagođen izdvajanjem srednjeg dijela u kojem je smješten dvodijelni spremnik, a na kojem je predviđen sudar. Ostatak broda dodan je u obliku točaka čije su koordinate smještene u izračunato težište tih dijelova te su im pridodane koncentrirane mase koje odgovaraju realnoj masi pojedinog dijela broda. Izgled takvog modela prikazan je slikom 33. gdje su crvenom bojom označene tri točke koncentrirane mase.



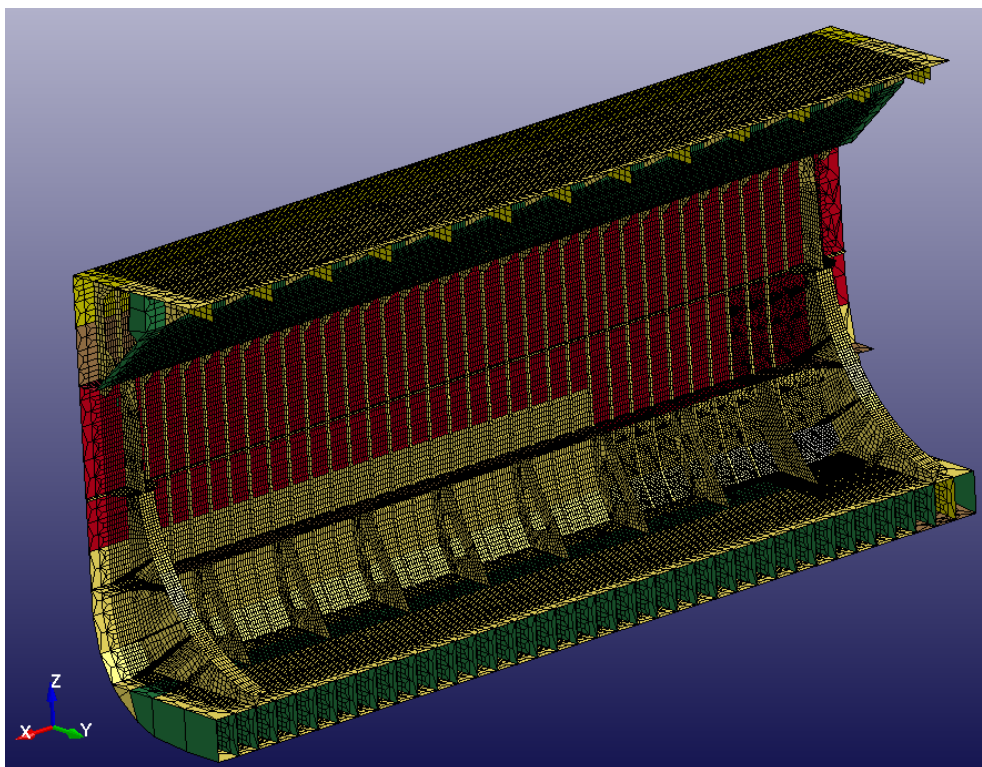
Slika 33. Sredina broda sa dvodijelnim spremnikom te trima točkama koncentrirane mase

Sa skraćenim vremenom trajanja proračuna ostavilo se prostora za modeliranje fine mreže boka udarenog broda kako bi se dobili realniji rezultati proračuna. Fina mreža rađena je u programskom paketu *Femap – Finite Element Modeling And Postprocessing, Version 10.3.0*. Odabrani dio boka prikazan je na slici 34. gdje je srednji dio iz kojeg su u *LS-Dyna*-i izbrisani elementi na kojima je izrađena fina mreža.



Slika 34. Srednji dio broda bez elemenata sa finom mrežom

Na slici 35. prikazan je samo dio sa finom mrežom. Gredni elementi pretvoreni su u pločaste formiranjem L-profila.

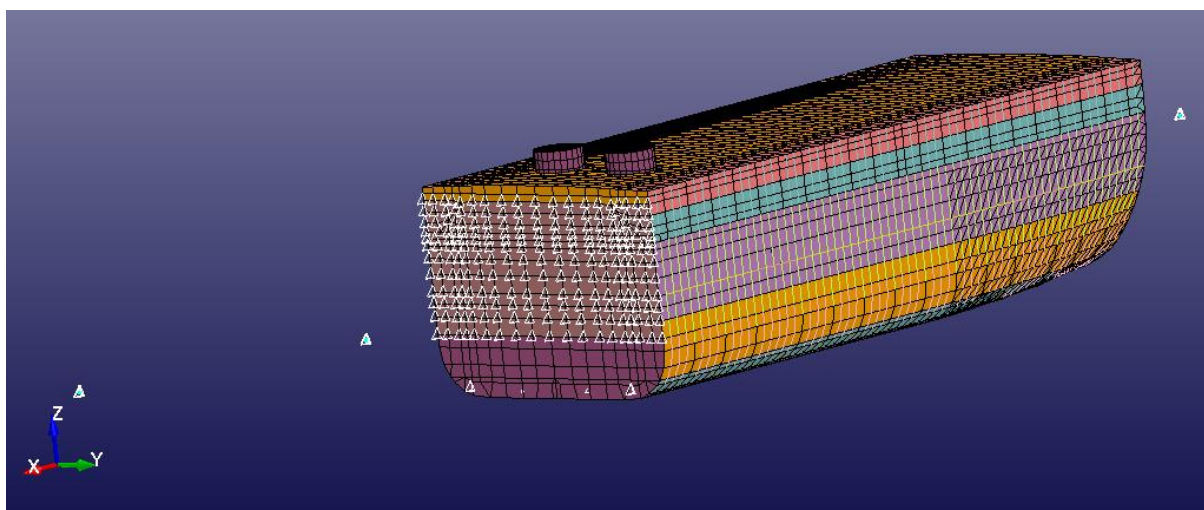


Slika 35. Dio boka broda sa finom mrežom

Fina mreža uklopljena je u grubu, te su u *LS-Dyna*-i spojeni dupli čvorovi. Ovime je pripremljen model sredine broda za konačni proračun.

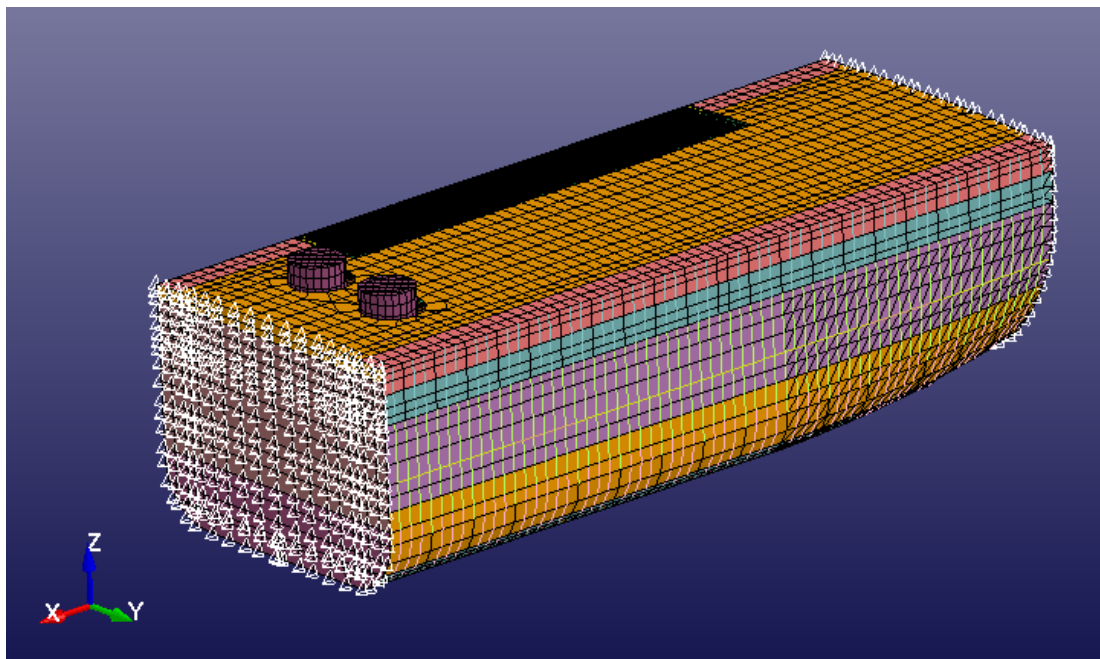
4.2.3. Rubni uvjeti i opterećenja

Kod postavljanja rubnih uvjeta i opterećenja, glavna misao je što realnije modelirati stvarnu situaciju. U slučaju analize sudara najprije je potrebno povezati točke koncentrirane mase sa udarenim brodom. Prilikom povezivanja koncentriranih masa sa srednjim dijelom broda bilo je potrebno jedan dio proglasiti potpuno krutim, odnosno neosjetljivim na naprezanja (RIGID – materijal beskonačne krutosti). Srednjem dijelu poprečne pregrade dodijeljena je takva karakteristika te su čvorovi preko posebno definiranog *PART-a povezani sa sredinom broda. Na slici 36. bijelim trokutima označeni su rubni uvjeti povezivanja čvorova pregrade sa čvorovima koncentrirane mase.



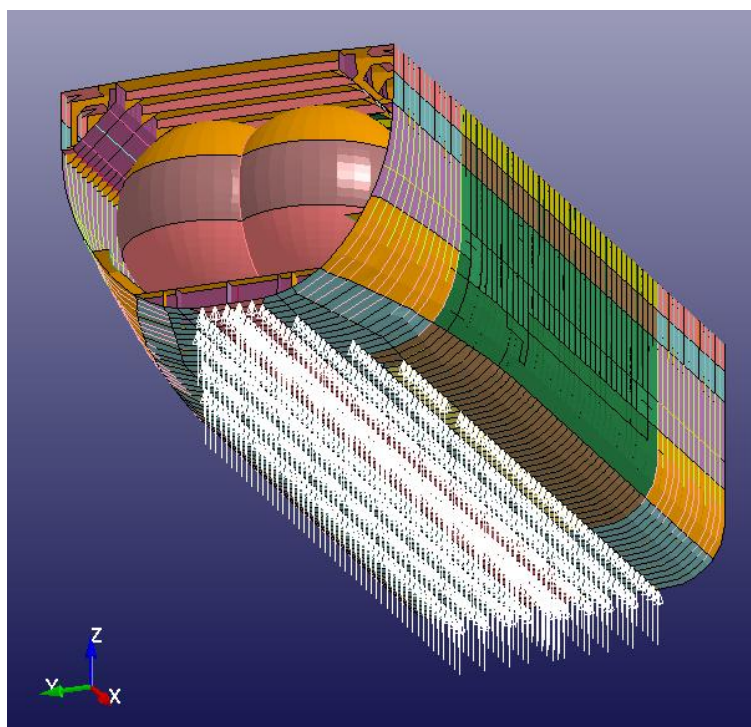
Slika 36. Sredina broda sa rubnim uvjetima pregrade i koncentriranih masa

Udarenom brodu su definirani setovi čvorova koji uključuju sve čvorove poprečne pregrade te pripadajuće rubne čvorove na drugom rubu. Tim setovima čvorova spriječen je pomak u smjeru osi z i na taj način osigurano da se cijeli udareni brod neće gibati prema gore. Na slici 37. bijelim trokutićima su označeni setovi tih čvorova.



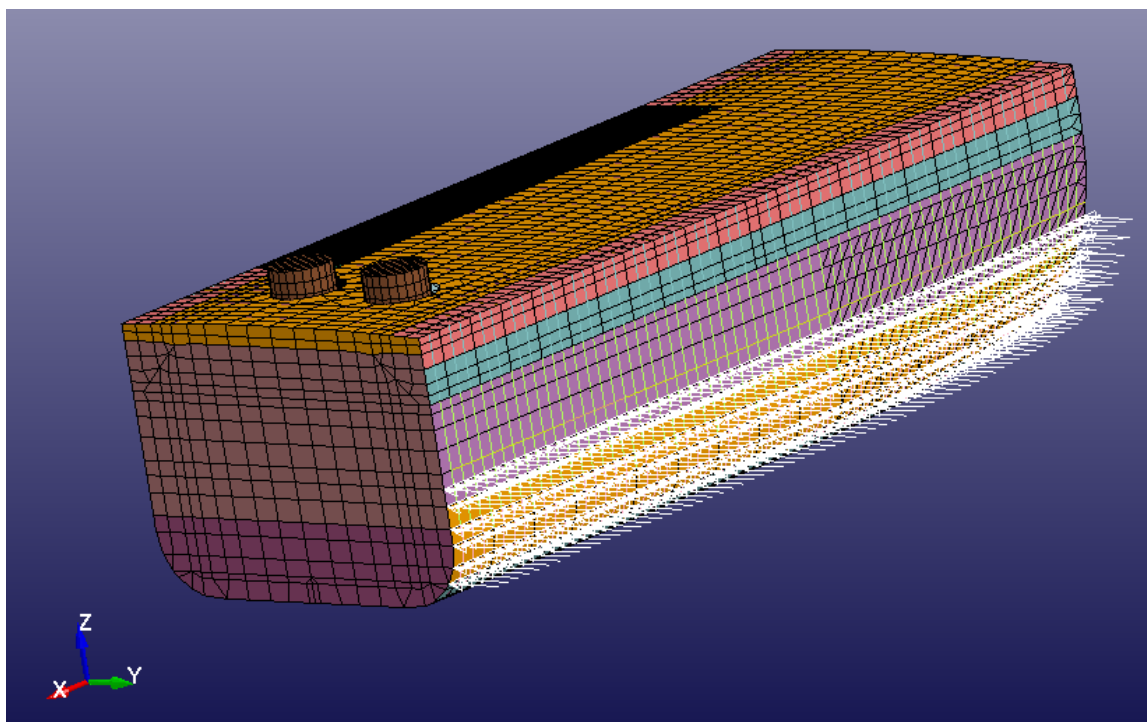
Slika 37. Sredina udarenog broda sa rubnim uvjetima pregrade i rubni čvorovi suprotnog kraja

Budući su oba broda opterećena silom gravitacije, potrebno je narinuti silu uzgona koja će udareni brod držati nasuprot sili gravitacije. Na slici 38. te su sile označene bijelim strelicama.



Slika 38. Raspored sile uzgona po vanjskoj oplati dvodna

U pokušaju simuliranja stvarne okoline u kojoj se sudar događa, bilo je potrebno definirati silu otpora koja se javlja uslijed sudara, odnosno inercijsku silu vode koja djeluje na boku udarenog broda suprotnom onom u kojeg udara pramac. Javljaju se dvije inercijske sile, jedna uslijed brzine i druga uslijed ubrzanja. Problem je riješen na način da se u čvorovima boka udarenog broda do gaza narinula sila definirana funkcijom. U oba slučaja funkcija se referirala na jedan čvor koncentrirane mase te obzirom na njegovo gibanje definirala iznos kojim su čvorovi boka opterećeni. Slikom 39. prikazan je smjer djelovanja tih sila.



Slika 39. Smjer djelovanja inercijskih sila uslijed brzine i ubrzanja na boku udarenog broda

Inercijska sila uslijed brzine definirana je na sljedeći način [11]:

—

gdje je:

ρgustoća fluida

$VY[\text{ref.čvor}]$brzina u smjeru osi y u referentnom čvoru

Apovršina na koju djeluje inercijska sila uslijed ubrzanja

Inercijska sila uslijed ubrzanja definirana je prema [11]:

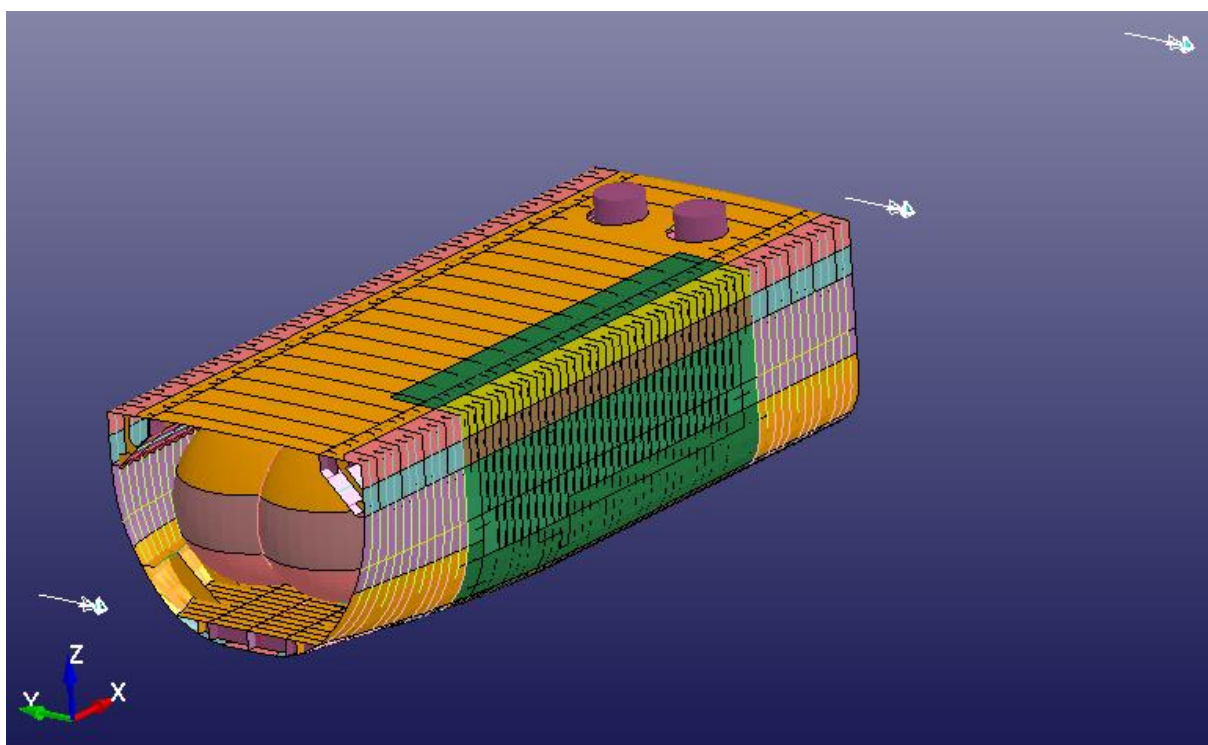
gdje je:

Δistisnina

ACCY[ref.čvor].....ubrzanje u smjeru osi y u referentnom čvoru

Referentni čvor je u oba slučaja krajnji čvor koncentrirane mase, na mjestu krme broda. On se pokazao kao dobar odabir referentnog čvora jer ne sudjeluje u stvaranju inercijske sile.

Na čvorove koncentriranih masa isto tako djeluju gore definirane inercijske sile. Iste su označene bijelim strelicama na slici 40. u smjeru njihovog djelovanja, negativnom smjeru osi y. Istim tim čvorovima, umjesto zadavanja sile uzgona, spriječen je pomak u smjeru osi z.



Slika 40. Spriječen pomak i inercijske sile u čvorovima koncentriranih masa

4.3. Materijali

Naredba *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY odnosi se na dvodimenzionalne konačne elemente pramca i srednjeg dijela broda. To je elasto-plastični materijal kod kojeg je moguće proizvoljno definirati linearnu ovisnost elastično-plastičnih deformacija o naprezanju. Uz to, potrebno je definirati vrijednost deformacije pri kojoj nastupa lom materijala. Prilikom proračuna se automatski briše element u kojem deformacije dostignu tu vrijednost.

Naredba *MAT_RESULTANT_PLASTICITY odnosi se na gredne elemente udarenog broda. To je elasto-plastični materijal koji je moguće primijeniti na Belitschko-Schwer gredne elemente.

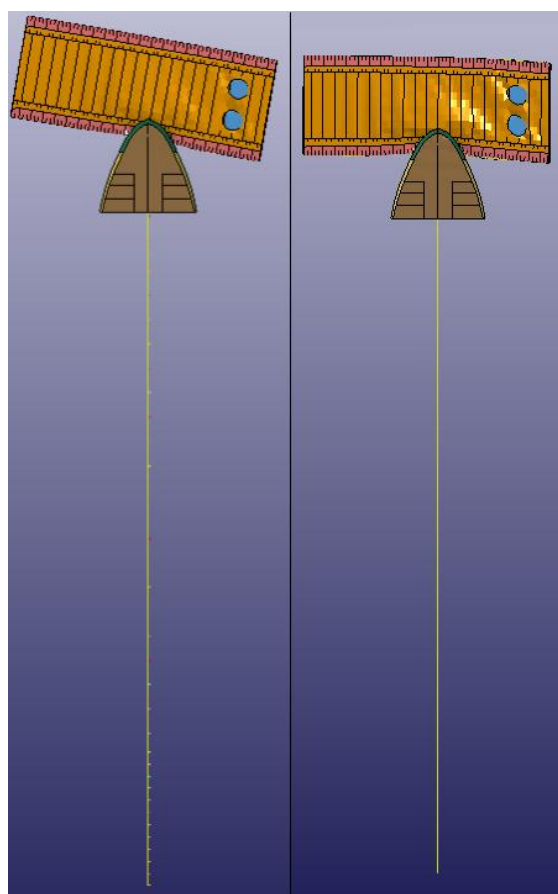
Naredba *MAT_RIGID odnosi se na dvodimenzionalne konačne elemente poprečne pregrade udarajućeg pramca i pregrade udarenog broda. Ova naredba definira materijal koji je beskonačno krut tako da određivanje gustoće materijala ili Youngovog modula elastičnosti nije bitno za naprezanja ali određuje masu pregrada.

Naredba *MAT_ELASTIC odnosi se na gredne konačne elemente udarajućeg broda. Kod grednih elemenata bitno je definirati pravu krutost, a gustoća bi se trebala smanjiti što više kako ne bi imali preveliku masu greda koje za proračun nisu bitne ukoliko je masa broda koncentrirana u čvorovima grednih elemenata.

Naredba *MAT_SPRING_NONLINEAR_ELASTIC odnosi se na opruge koje simuliraju uzgonske sile i prigušne elemente. Iz samog naziva naredbe vidi se da materijal osigurava nelinearnu ovisnost sile o pomaku opruge.[8]

4.4. Preliminarni proračun sa grubom mrežom konačnih elemenata

Radi pobližeg označavanja i provjere svrhe inercijih sila, izvedena su četiri različita proračuna istih rubnih uvjeta, ali različito narinutih inercijskih sila. Sva četiri slučaja potvrđuju da ukoliko nema inercijskih sila, udareni brod se nastavi gibati sa udarajućim brodom, što je za očekivati obzirom na teoriju sudara. Ukoliko se narinu inercijske sile brzine i ubrzanja pojedinačno, udareni brod je donekle zaustavljen, međutim mehaniku sudara najrealnije opisuje scenarij u kojem su boku udarenog broda narinute obje inercijske sile. Obzirom da su scenariji u kojima su pojedinačno narinute inercijske sile uslijed brzine i ubrzanja vrlo slični jedan drugome, radi ilustracije su slikom 41. prikazani scenarij u kojem uopće nema inercijskih sila i onaj u kojem su narinute obje. Obje su analize zaustavljene u istom vremenskom koraku, nakon nešto više od jedne sekunde i jasno je vidljivo da je mehanika gibanja drugačija. Bez inercijskih sila dolazi do manje oštećenja i većeg pomaka udarenog broda skupa s udarajućim, dok je u slučaju narinutih inercijskih sila situacija takva da dolazi do jačeg prodiranja pramca u bok udarenog broda.



Slika 41. Sudar bez i sa inercijskim silama na boku udarenog broda

5. NUMERIČKA ANALIZA

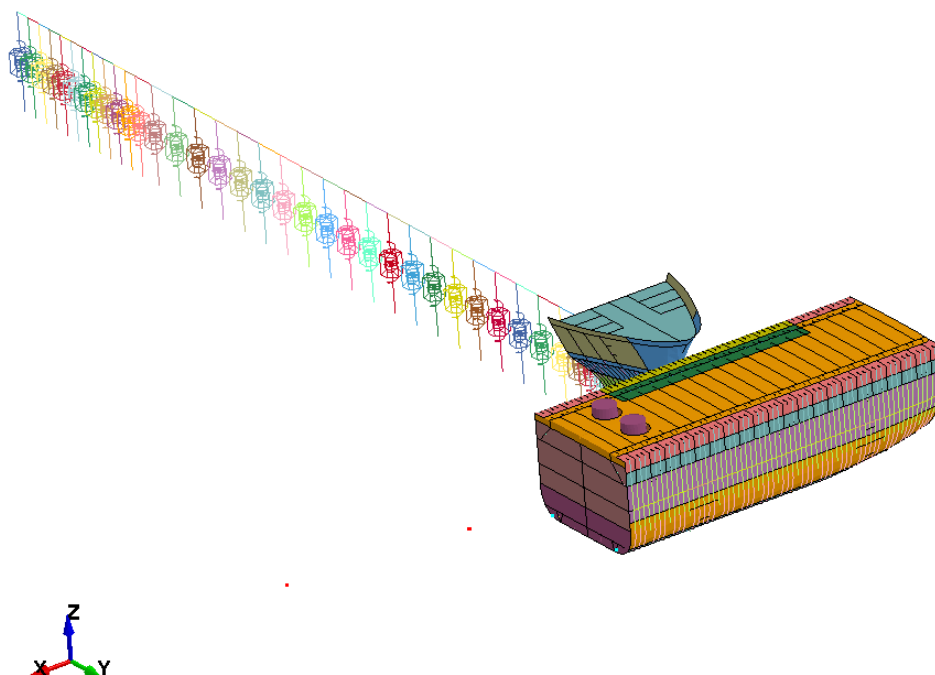
Kako bi se rezultati numeričke analize sudara mogli što korektnije interpretirati, korisno je imati nekoliko različitih scenarija za usporedbu. Ovaj rad obuhvaća pet različitih scenarija sudara u kojima su varirane brzina udarajućeg broda i lokacija sudara promjenom gazova.

U tablici 4. nalazi se kratki prikaz svih scenarija sudara.

Tablica 4. Scenariji sudara

| | |
|---------|---------------------------|
| Sudar 1 | $v=5$ m/s, T-balast |
| Sudar 2 | $v=8$ m/s, T-balast |
| Sudar 3 | $v=10$ m/s, T-balast |
| Sudar 4 | $v=8$ m/s, T-balast+1 [m] |
| Sudar 5 | $v=8$ m/s, T-balast-2 [m] |

Na slici 42. Prikazana su oba broda te njihove pozicije prije sudara. Vidljivo je da se sudar događa pramcem udarajućeg broda u bok srednjeg dijela udarenog broda pod kutem od 90° .

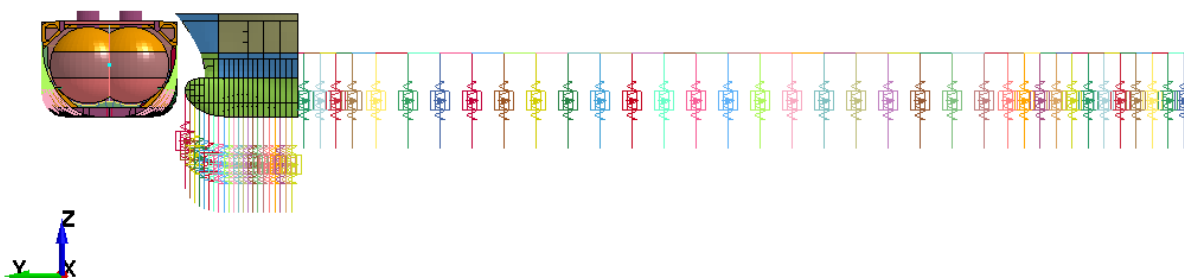


Slika 42. Općeniti prikaz sudara

5.1. Sudar 1

Scenarij sudara 1 podrazumijeva brzinu udarajućeg broda od 5 m/s, a lokacija sudara je ona kada su oba broda na gazovima u balastu.

Brzina je zadana putem sile koja je narinuta na svaku pojedinu točku koncentrirane mase na gredi udarajućeg broda. Udarajući brod ubrzava do trenutka kontakta sa udarenim brodom te od tog trenutka nema više narinutu brzinu, već se giba vlastitom inercijom i usporava uslijed sudara sa bokom udarenog broda. Na slici 43. vidljive su pozicije oba broda prije početka sudara.



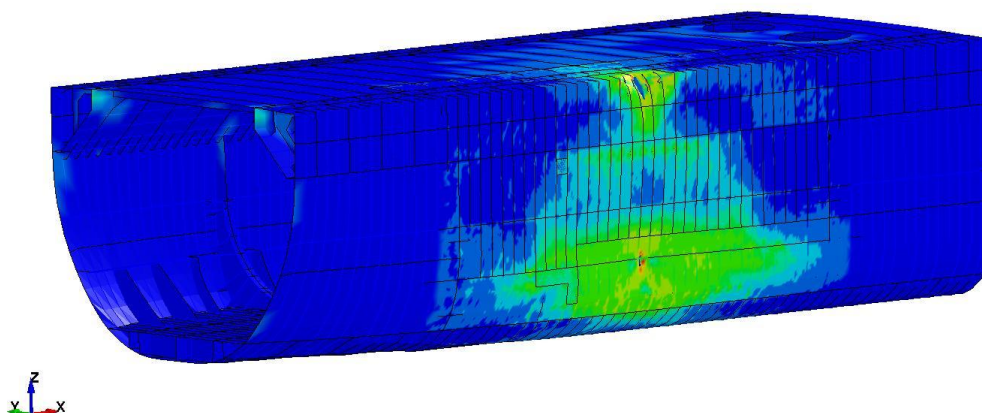
Slika 43. Oba broda prije sudara na gazovima u balastu

Na slici 44. prikazana su naprezanja na boku udarenog broda u trenutku $t = 0.53s$.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
Time = 0.53
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 10000001
max=4.56141e+08, at elem# 38321

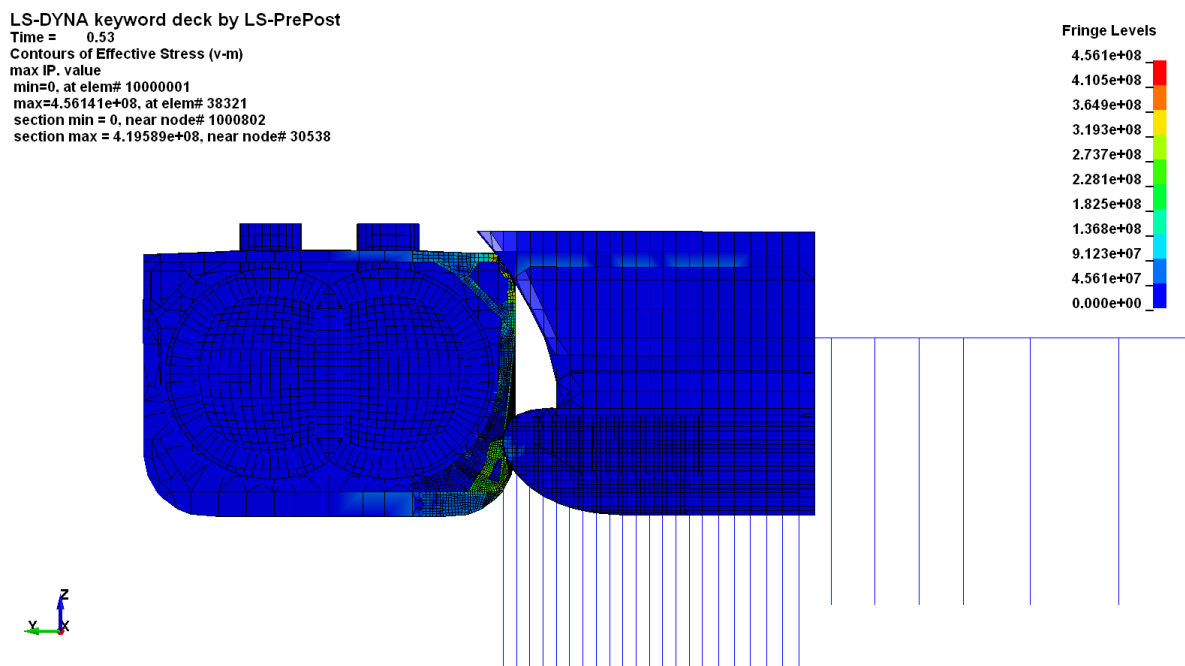
Fringe Levels

| |
|-----------|
| 4.561e+08 |
| 4.105e+08 |
| 3.649e+08 |
| 3.193e+08 |
| 2.737e+08 |
| 2.281e+08 |
| 1.825e+08 |
| 1.368e+08 |
| 9.123e+07 |
| 4.561e+07 |
| 0.000e+00 |



Slika 44. Ukupna (von Mises) naprezanja na boku udarenog broda pri brzini $v=5$ m/s

Na slici 45. prikazano je napredovanje udarajućeg pramca u bok udarenog broda u navedenom trenutku sudara.

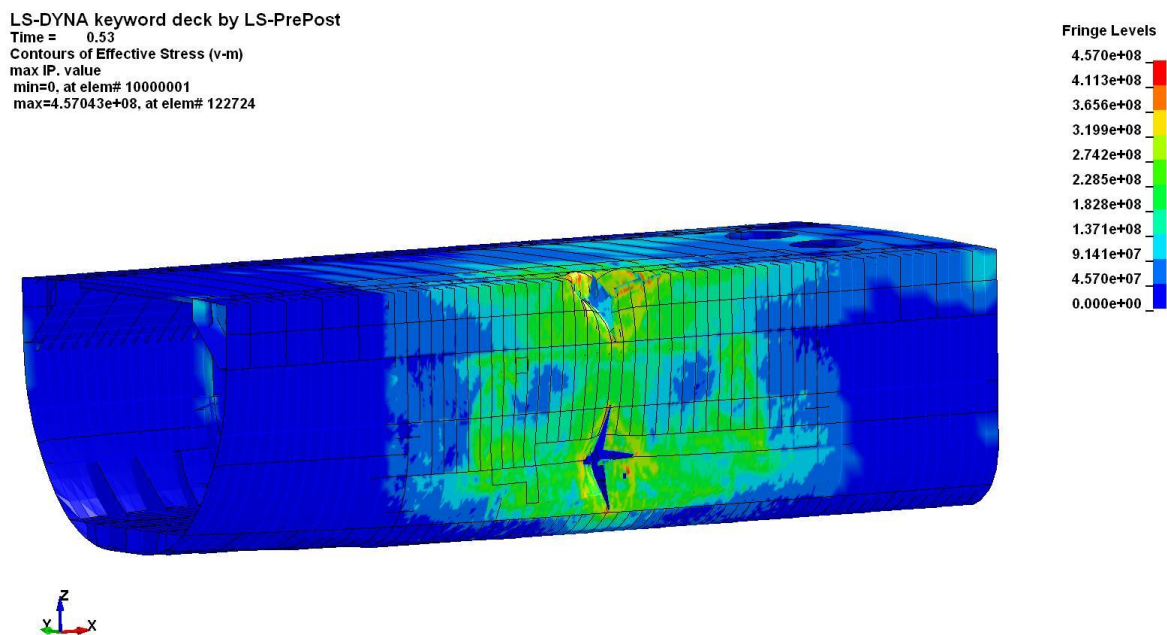


Slika 45. Razina napredovanja pramca u bok udarenog broda pri brzini $v=5$ m/s

Iz slika 44. i 45. je vidljivo da je u trenutku sudara $t = 0.53$ s pramac udarajućeg broda relativno na početku prodiranja u bok udarenog broda. Javljaju se velika naprezanja na boku udarenog broda prije nego dođe do njihovog pucanja.

5.2. Sudar 2

Scenarij sudara 2 podrazumijeva brzinu udarajućeg broda od 8 m/s, a lokacija sudara je ona kada su oba broda na gazovima u balastu. Veća brzina je postignuta povećanjem faktora skaliranja u naredbi *LOAD_NODE_POINT. Na slici 46. vidljiva su naprezanja na boku udarenog broda te da je u trenutku sudara $t = 0.53\text{s}$ već došlo do pucanja elemenata na boku udarenog broda, za razliku od prethodnog scenarija.

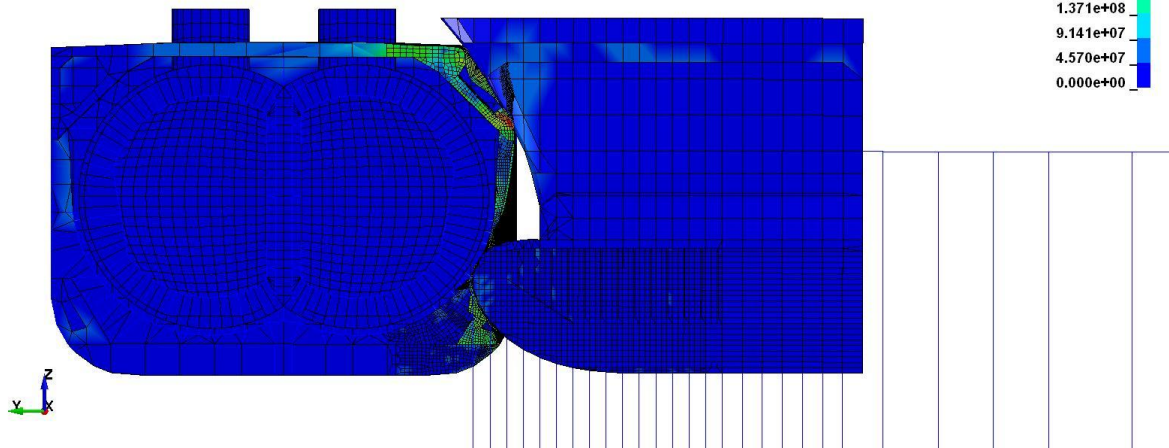


Slika 46. Ukupna (von Mises) naprezanja na boku udarenog broda pri brzini sudara $v=8\text{ m/s}$

Na slici 47. Vidljivo je da je došlo do većeg prodiranja udarajućeg pramca u bok udarenog broda, što je i za očekivati obzirom na povećanu brzinu sudara.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
 Time = 0.53
 Contours of Effective Stress (v-m)
 max IP. value
 min=0, at elem# 10000001
 max=4.57043e+08, at elem# 122724
 section min = 0, near node# 1000802
 section max = 3.88278e+08, near node# 51400

Fringe Levels
 4.570e+08
 4.113e+08
 3.656e+08
 3.199e+08
 2.742e+08
 2.285e+08
 1.828e+08
 1.371e+08
 9.141e+07
 4.570e+07
 0.000e+00



Slika 47. Razina napredovanja pramca u bok udarenog broda pri brzini $v=8$ m/s

5.3. Sudar 3

Scenarij sudara 3 podrazumijeva brzinu udarajućeg broda od 10 m/s, a lokacija sudara je ona kada su oba broda na gazovima u balastu. Na slici 48. prikazana je deformacija boka udarenog broda na kojoj je vidljivo da se pri još većoj brzini sudara javljaju, kako veća oštećenja na boku udarenog broda, tako i naprezanja koja u ovom slučaju prelaze i na palubu udarenog broda.

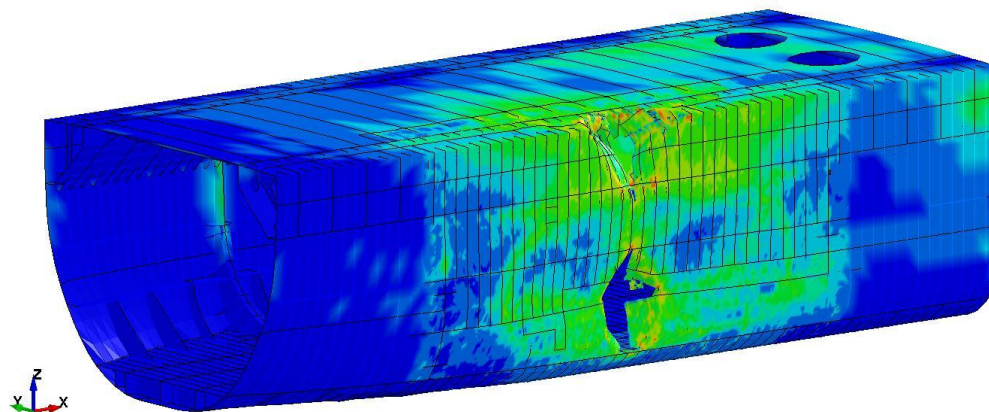
Na slici 49., gdje je prikazano napredovanje pramca udarajućeg broda u bok udarenog broda, vidljivo je da je pramac stigao do spremnika čiju stijenu počinje deformirati.

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time = 0.53
 Contours of Effective Stress (v-m)
 max IP. value
 min=0, at elem# 10000001
 max=4.57037e+08, at elem# 54432

Fringe Levels

4.570e+08
 4.113e+08
 3.656e+08
 3.199e+08
 2.742e+08
 2.285e+08
 1.828e+08
 1.371e+08
 9.141e+07
 4.570e+07
 0.000e+00



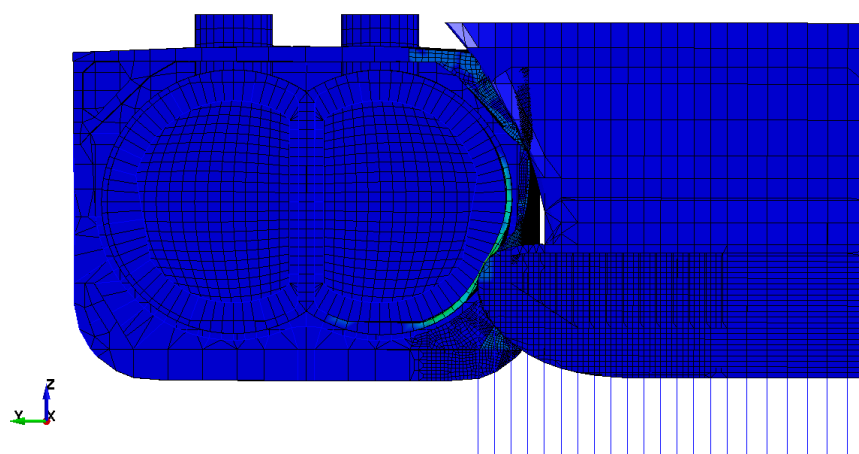
Slika 48. Ukupna (von Mises) naprezanja na boku udarenog broda pri brzini sudara $v=10$ m/s

LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost

Time = 0.53
 Contours of Effective Stress (v-m)
 max IP. value
 min=0, at elem# 10000001
 max=2.29327e+09, at elem# 147799
 section min = 0, near node# 1000802
 section max = 1.17916e+09, near node# 143600

Fringe Levels

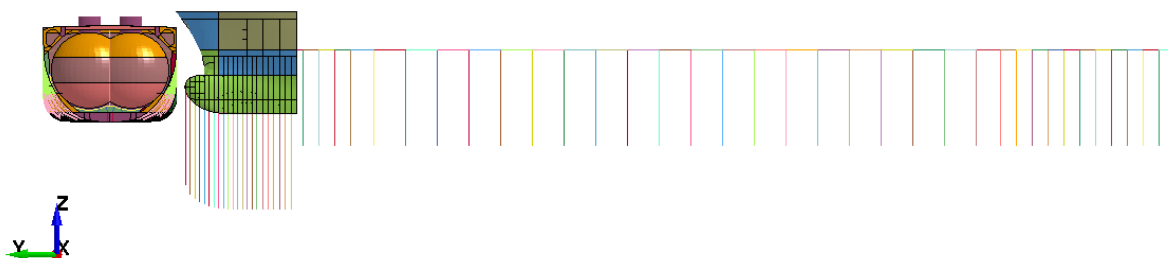
2.293e+09
 2.064e+09
 1.835e+09
 1.605e+09
 1.376e+09
 1.147e+09
 9.173e+08
 6.880e+08
 4.587e+08
 2.293e+08
 0.000e+00



Slika 49. Razina napredovanja pramca u bok udarenog broda pri brzini $v=10$ m/s

5.4. Sudar 4

Scenarij sudara 4 podrazumijeva brzinu udarajućeg broda od 8 m/s, a lokacija sudara je ona kada je udareni brod na gazu u balastu, a udarajući na manjem gazu od balasnog. Na slici 50. vidljive su pozicije oba broda prije početka sudara.



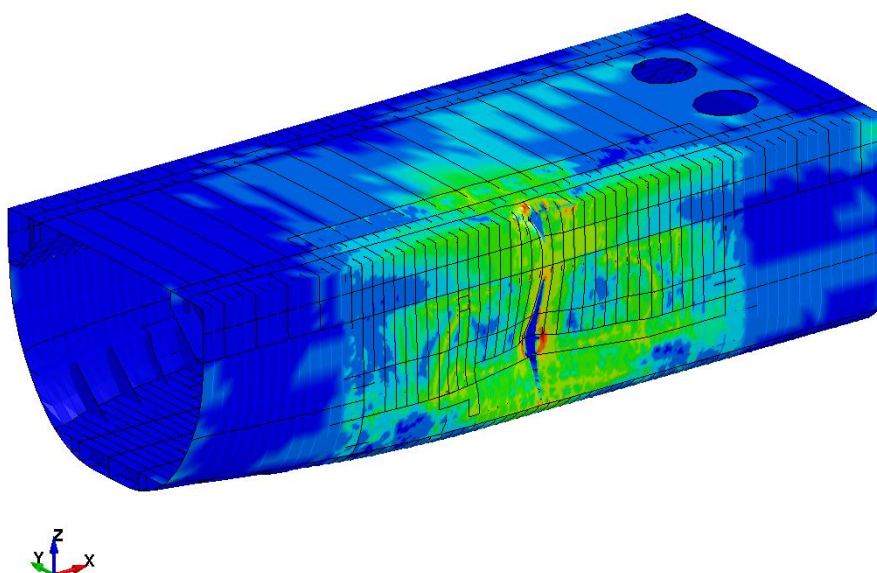
Slika 50. Prikaz oba broda prije sudara pri brzini $v=8$ m/s i s povećanim gazom udarenog broda

Na slici 51. prikazana je deformacija boka udarenog broda. U ovom slučaju se na boku udarenog broda javljaju manja naprezanja te manje deformacije od onih u scenariju iste brzine, ali gazova u balastu.

LS-DYNA KEYWORD DECK BY LS-PREPOST
Time = 0.53
Contours of Effective Stress (v-m)
max IP. value
min=0, at elem# 10000001
max=4.56088e+08, at elem# 129257

Fringe Levels

4.561e+08
4.105e+08
3.649e+08
3.193e+08
2.737e+08
2.280e+08
1.824e+08
1.368e+08
9.122e+07
4.561e+07
0.000e+00



Slika 51. Ukupna (von Mises) naprezanja na boku udarenog broda pri brzini sudara $v=8$ m/s i povećanim gazom udarenog broda

Budući se radi o drugačijim gazovima od onih u scenariju sudara 2, ovaj puta u trenutku sudara $t = 0.53\text{s}$ u bok udarenog broda većim dijelom prodire sami bulb udarajućeg pramca. Obzirom da se radi o mjestu na kojem je i presjek spremnika većeg radijusa, na slici 52. vidljivo je da bulb udarajućeg broda započinje deformaciju stijenke spremnika.

LS-DYNA KEYWORD DECK BY LS-PREPOST

Time = 0.53

Contours of Effective Stress (v-m)

max IP. value

min=0, at elem# 10000001

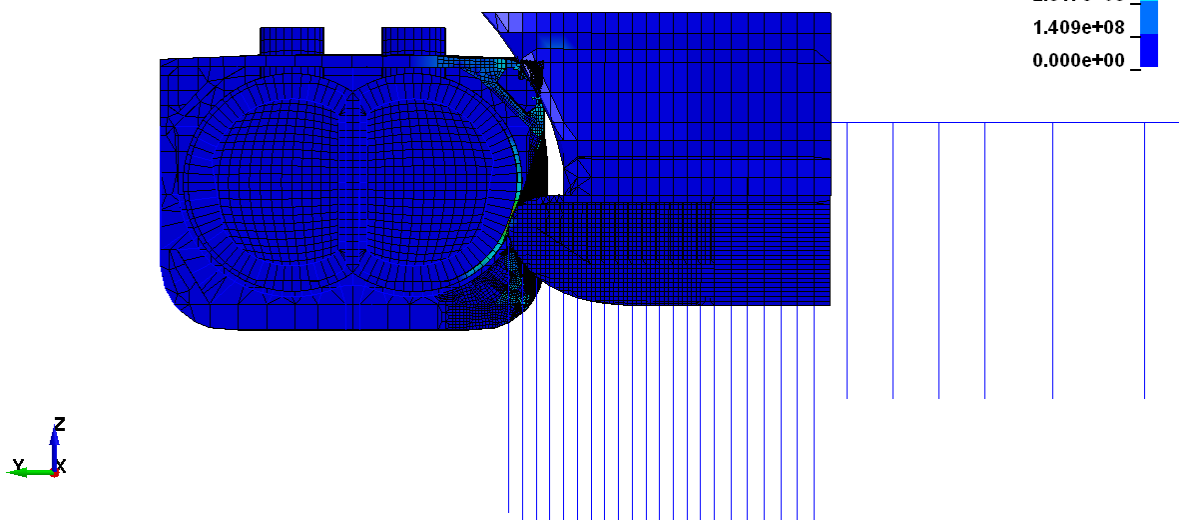
max=1.40868e+09, at elem# 147800

section min = 3.52499e+06, near node# 144425

section max = 3.68777e+08, near node# 117697

Fringe Levels

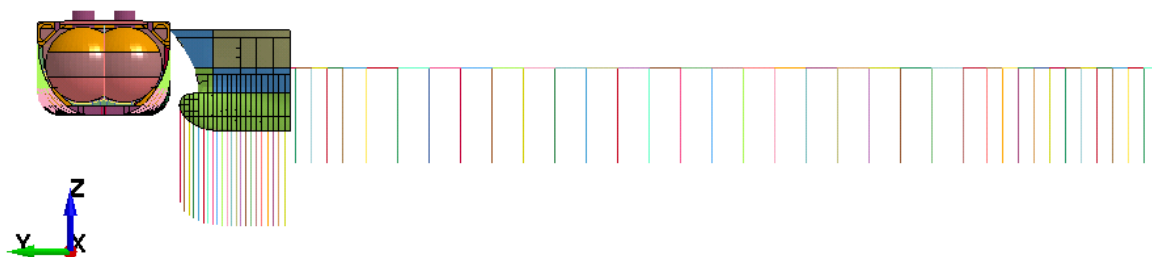
1.409e+09
1.268e+09
1.127e+09
9.861e+08
8.452e+08
7.043e+08
5.635e+08
4.226e+08
2.817e+08
1.409e+08
0.000e+00



Slika 52. Razina napredovanja pramca u bok udarenog broda pri brzini $v=8\text{ m/s}$ i s povećanim gazom udarenog broda

5.5. Sudar 5

Scenarij sudara 5 podrazumijeva brzinu udarajućeg broda od 8 m/s, a lokacija sudara je ona kada je udarajući brod na većem gazu od balasnog, a udareni na manjem. Na slici 53. vidljive su pozicije oba broda prije početka sudara.



Slika 53. Prikaz oba broda prije sudara pri brzini $v=8$ m/s i sa smanjenim gazom udarenog broda

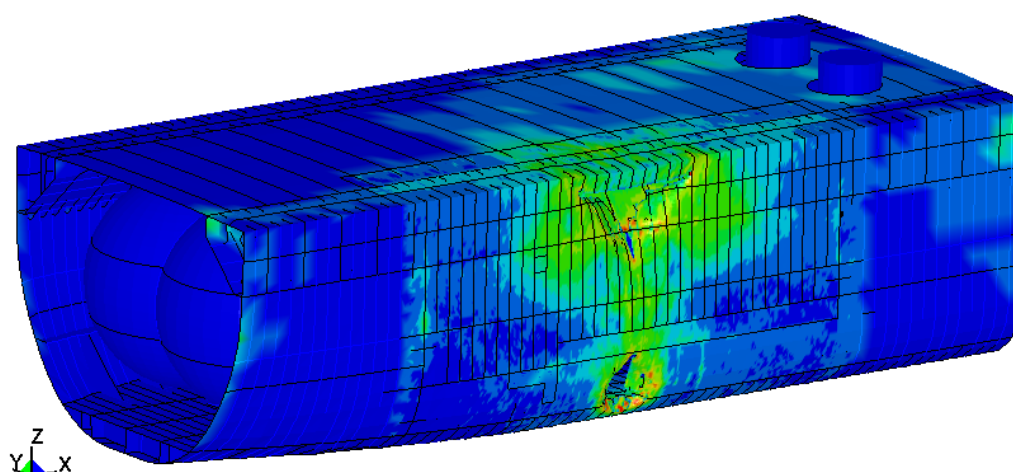
Na slici 54. vidljiva je deformacija boka broda uslijed prodiranja cijelog pramca udarajućeg broda. Dvodno udarenog broda oštećeno je uslijed prodiranja bulba, dok je bok broda oštećen uslijed prodiranja gornjeg dijela pramca.

LS-DYNA KEYWORD DECK BY LS-PREPOST

Time = 0.53
Contours of Effective Stress (v-m)
max ipt. value
min=0, at elem# 10000001
max=4.57278e+08, at elem# 36870

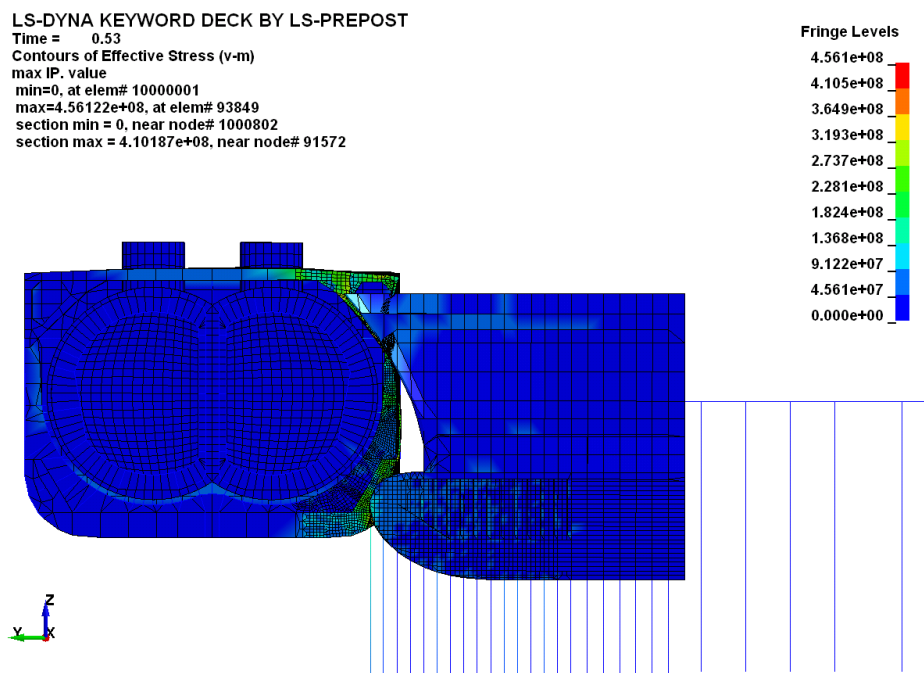
Fringe Levels

4.573e+08
4.116e+08
3.658e+08
3.201e+08
2.744e+08
2.286e+08
1.829e+08
1.372e+08
9.146e+07
4.573e+07
0.000e+00

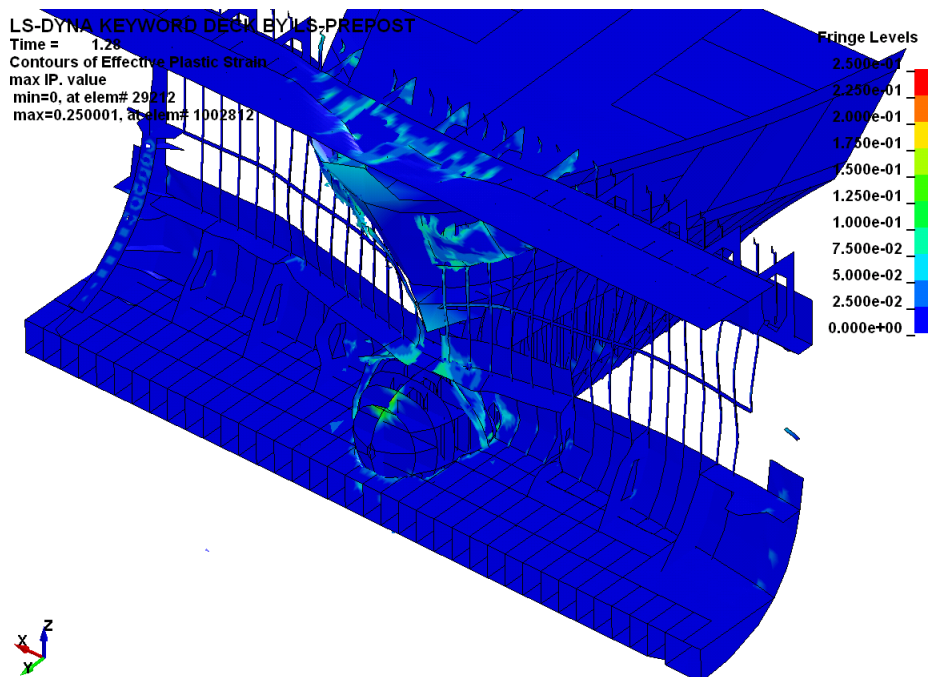


Slika 54. Ukupna (von Mises) naprezanja na boku udarenog broda pri brzini sudara $v=8$ m/s i sa smanjenim gazom udarenog broda

Na slici 55. vidi se da pramac u trenutku $t = 0.53\text{s}$ nije dotaknuo spremnik unatoč relativno velikom napredovanju gornjeg dijela pramca u bok broda.



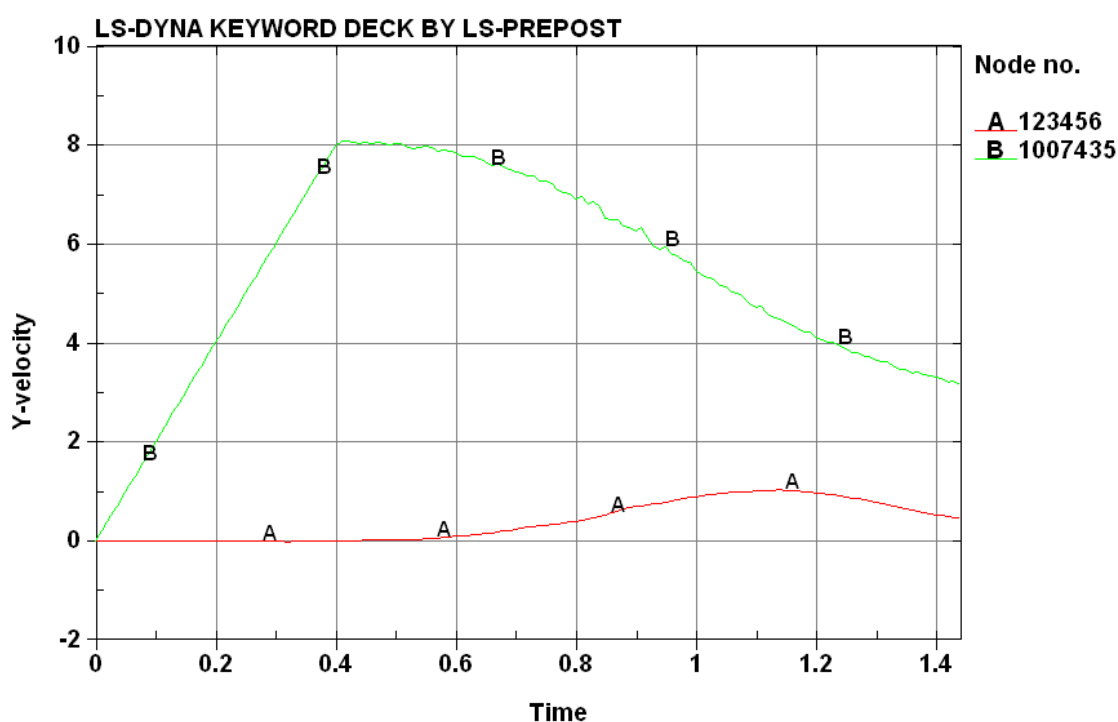
Slika 55. Razina napredovanja pramca u bok udarenog broda pri brzini $v=8\text{ m/s}$ i sa smanjenim gazom udarenog broda



Slika 56. Prodor udarajućeg bulba u strukturu dvodna

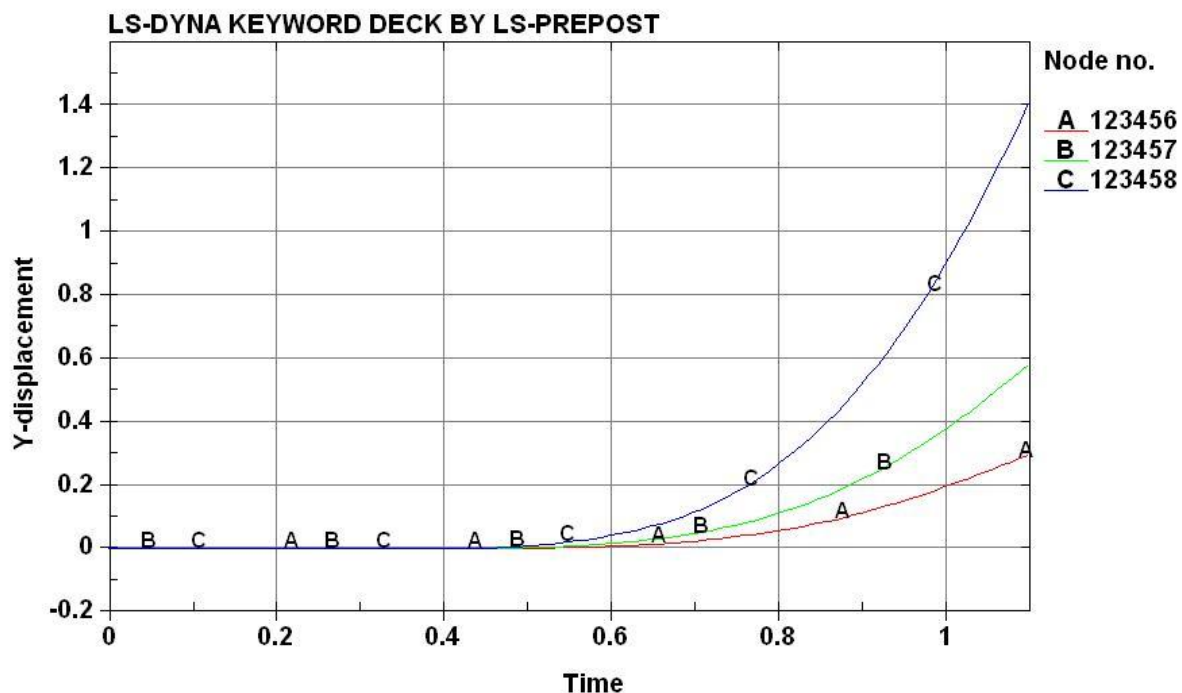
5.6. Analiza i usporedbe različitih scenarija sudara

Na slici 56. prikazan je dijagram brzina za dvije odabrane točke sudara pri brzini od $v=8$ m/s. Točka B na dijagramu predstavlja brzinu udarajućeg broda, a točka A predstavlja brzinu udarenog broda. Iz dijagrama je vidljivo kako udarajući brod ubrzava do brzine od 8 m/s do trenutka sudara, $t = 0.41$ s, dok se udareni brod do tog trenutka ne giba, a nakon sudara je vidljivo da postebeno dobiva brzinu uslijed sudara. Iz dijagrama se može zaključiti da će udarajući brod usporavati, a udareni ubrzavati dok im se brzine ne usklade te će od tog trenutka nastaviti usporavati jednakim trendom.



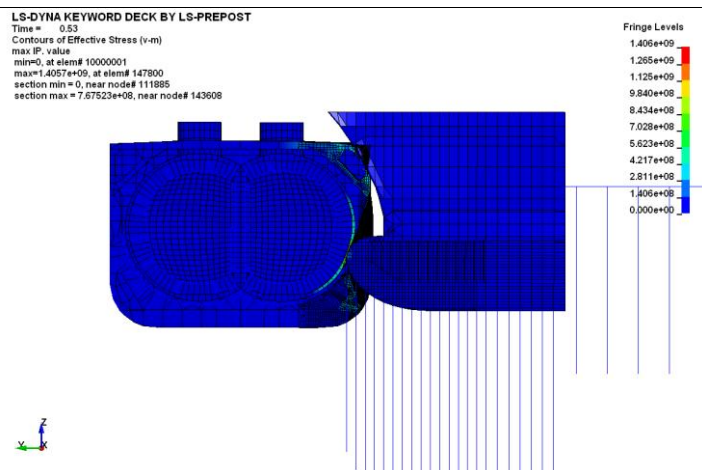
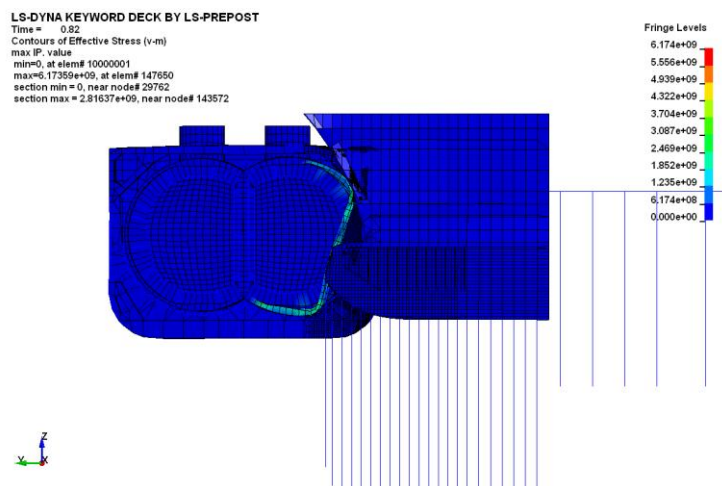
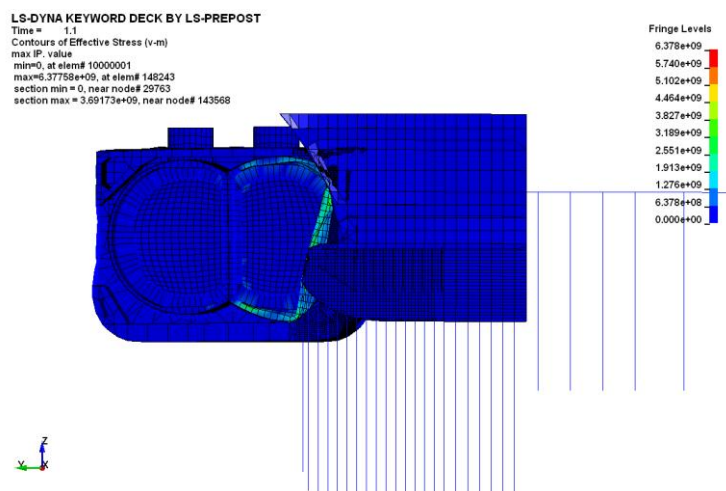
Slika 57. Dijagram brzina udarajućeg i udarenog broda za $v=8$ m/s

Na slici 57. prikazan je dijagram pomicanja točaka koncentrirane mase udarenog broda u smjeru osi y. Točka A predstavlja gibanje koncentrirane mase pramca, točka B predstavlja gibanje teretnog prostora sa cilindričnim spremnikom koji se nastavlja na pramac, a točka C gibanje koncentrirane mase krme i nadgrađa. Iz dijagrama je vidljivo da se najviše pomiče točka C odnosno koncentrirana masa krme i nadgrađa, što je za očekivati obzirom na lokaciju sudara u usporedbi sa ukupnom duljinom broda. Teretni prostor na kojem je predviđen sudar bliže je krmi, stoga je logično da će se cijeli brod gibati na taj način za vrijeme trajanja sudara.

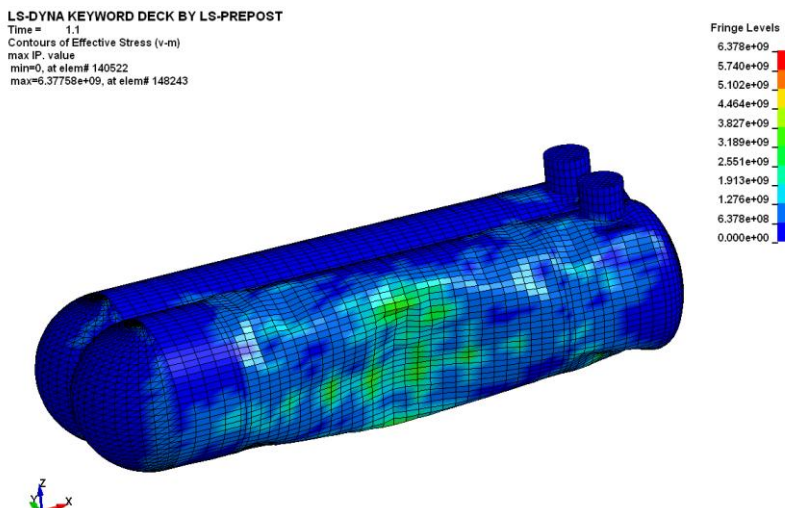


Slika 58. Dijagram pomaka točaka koncentriranih masa udarenog broda

Slikama 58., 59. i 60. prikazan je sudar pri brzini od $v=8$ m/s u različitim vremenskim intervalima, odnosno u trenutku $T=0.56$ s na slici 58., vremenu $t = 0.82$ s na slici 59. te vremenu $t = 1.1$ s na slici 60. Time je ilustrativno prikazan progres udarajućeg pramca u bok udarenog broda.

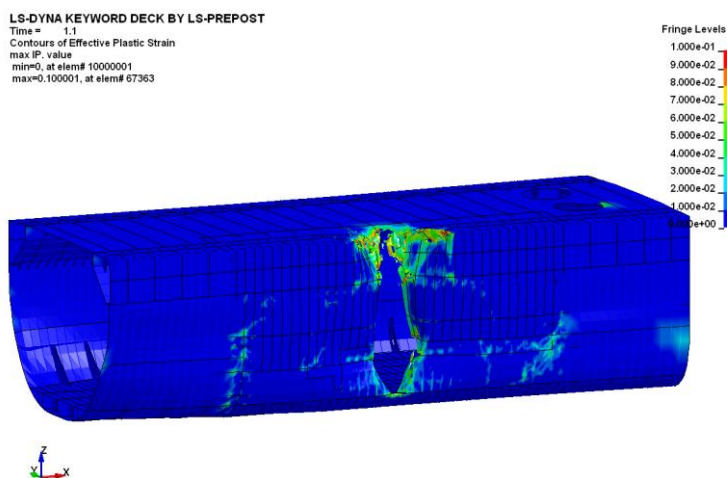
Slika 59. Sudar pri brzini $v=8$ m/s i vremenu $t = 0.53s$ Slika 60. Sudar pri brzini $v=8$ m/s i vremenu $t = 0.82s$ Slika 61. Sudar pri brzini $v=8$ m/s i vremenu $t = 1.1s$

Na slici 61. prikazan je spremnik na kojem je vidljiva deformacija pri sudaru od $v=8$ m/s i vremenu $t = 1.1$ s. Obzirom da je zbog skraćivanja vremena proračuna spremniku dodijeljen elastični materijal, nije došlo do pucanja spremnika, no to ne predstavlja nužno i realnu situaciju sudara. Vrlo vjerovatno bi došlo i do oštećivanja spremnika obzirom na zabilježena velika naprezanja koja se na njemu javljaju.

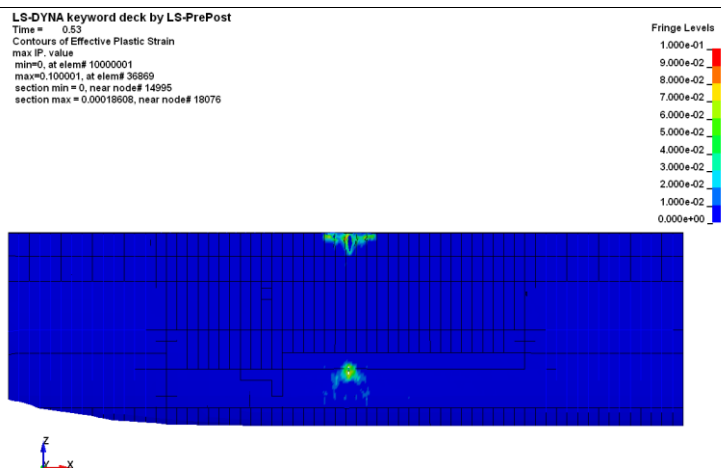
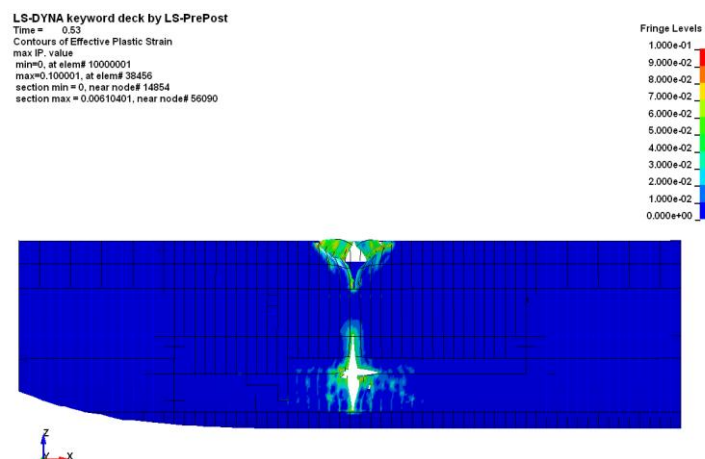
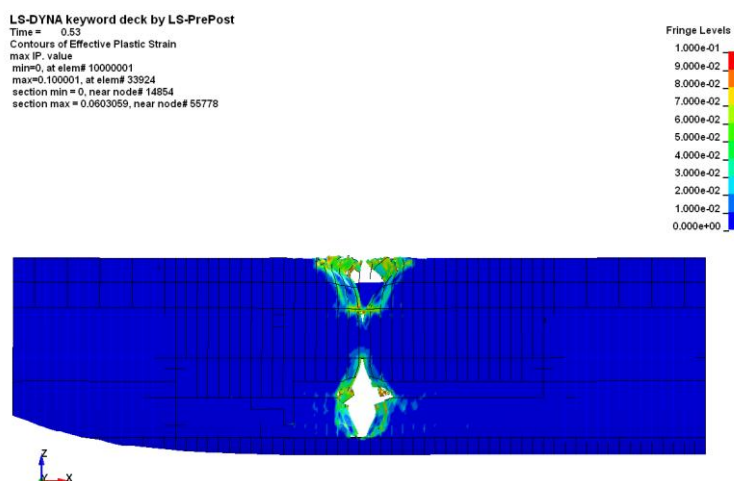


Slika 62. Ukupna (von Mises) naprezanja i deformacija spremnika pri brzini $v=8$ m/s i vremenu $t = 1.1$ s

Na slici 62. prikazana su plastična naprezanja u boku udarenog broda prilikom sudara sa brzinom $v=8$ m/s i vremenu trajanja sudara $t = 1.1$ s. Na slikama 63., 64. i 65. prikazana je usporedba plastičnih naprezanja u boku za različite brzine sudara gdje je vidljivo da veća brzina uzrokuje i veća plastična naprezanja.



Slika 63. Plastična naprezanja pri brzini $v=8$ m/s i vremenu $t = 1.1$ s

Slika 64. Plastična naprezanja na boku, sudar pri brzini $v=5$ m/s i vremenu $t = 0.53$ sSlika 65. Plastična naprezanja na boku, sudar pri brzini $v=8$ m/s i vremenu $t = 0.53$ sSlika 66. Plastična naprezanja na boku, sudar pri brzini $v=10$ m/s i vremenu $t = 0.53$ s

6. ZAKLJUČAK

Umjerena cijena i ekološka prihvatljivost prednosti su zbog kojih je plin, uz naftu, jedan od glavnih energenata današnjice. Uz transport plina cjevovodima, u velikoj mjeri je prisutan i transport ukapljenog plina LNG i LPG brodovima. Sigurnost tog dijela pomorskog transporta izrazito je visoka i regulirana strogima pravilima te do danas ne bilježimo niti jedan incident koji je odnio ljudske živote ili uzrokovao ekološku katastrofu. Unatoč tome, rizici ovakve vrste transporta u stalnom su porastu, kako zbog gradnje sve većih plovila što nosi i gradnju većih spremnika, tako zbog porasta čarter prijevoza umjesto plovidbe na stalnim rutama. Sve to ukazuje na potrebu preispitivanja sigurnosti konstrukcije LNG i LPG brodova te spremnika u njima.

Ovaj rad se bavi analizom sudara broda s LPG brodom. Najprije je bilo potrebno prilagoditi model LPG broda koji je modeliran u SESAM-u za korištenje u programu LS-Dyna u kojem je obavljena simulacija različitih scenarija sudara. Prilikom prilagodbe modela pojavio se problem učitavanja grednih elemenata te njihovo ponašanje pri samom sudaru. Naime, gredni elementi kojima je dodijeljena elastična karakteristika materijala nisu se realistično ponašali, što je dijelom i očekivano. Stoga je bilo potrebno pronaći podatan materijal kojih je za gredne elemente formulacije Belitschko-Schwer vrlo malo dano na odabir. Kao pogodan se pokazao materijal `RELATIVE_PLASTICITY` elasto-plastične karakteristike.

Zanimljivo je promatrati scenarije sudara pri različitim brzinama koji su jasno pokazali veće oštećenje boka udarenog broda ukoliko se brzina sudara poveća. Iz analiziranih scenarija vidljivo je da do oštećenja boka LPG broda dolazi vrlo brzo nakon prvotnog kontakta s udarajućim pramcem, što može ukazivati na nedovoljnu čvrstoću konstrukcije boka takvog broda prilikom sudara. Na isto ukazuju i velika naprezanja koja se pojavljuju na spremniku.

Numeričko modeliranje analize sudara zahjevno je i kompleksno te obuhvaća brojne faktore koje je potrebno uzeti u obzir poput odabira pravog materijala, pravilnog rasporeda sila koje utječu na model, odabira rubnih uvjeta kako bi se što realnije modelirala stvarna situacija sudara i dr. Model u ovom diplomskom radu pokazao se kao zadovoljavajući za analizu sudara te bi se u budućnosti mogao poboljšati kako bi obuhvatio analizu spremnika i ostalih dijelova udarenog broda.

LITERATURA

- [1] Sclaunich, D., Njegovan, M., Marulić, S.: Svjetsko tržište zemnog plina, Rijeka.
- [2] Rudan, S.: Sigurnost konstrukcije spremnika na brodovima za prijevoz ukapljenog plina, Zagreb 2006.
- [3] International Gas Union: World LNG Report 2011, Oslo, 2012.
- [4] www.shipbuildinghistory.com
- [5] www.emsa.europa.eu
- [6] Zhang, S.: The Mechanics of Ship Collisions, Technical University of Denmark, 1999.
- [7] Paar, R.: Metode konačnih elemenata, Zagreb, 2003.
- [8] Srdelić, M.: Razrada postupka numeričkog proračuna nasukavanja broda metodom konačnih elemenata, Zagreb 2010.
- [9] Det Norske Veritas : Sesam Input Interface File , 1996.
- [10] Livermore Software Technology Corporaton: LS-DYNA, Keyword Users Manual, 2002.
- [11] Prpić-Oršić, J., Čorić, V.: Pomorstvenost plovnih objekata, Rijeka 2006.
- [12] Bralić, T., Slišković, M.: Najveće tankerske nezgode, Zagreb, 2006.
- [13] Simon, K., Malnar, M., Vrzic, V.: Pregled procesa ukapljivanja prirodnog plina, Zagreb, 2009.
- [14] Lušić, Z.: Procjena broja sudara brodova pri križanju plovidbenih putova, Zagreb, 2005.
- [15] Posavec, D., Simon, K., Malnar, M.: Brodovi za ukapljeni prirodni plin, Zagreb, 2010.